UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**Metodología para la generación y evaluación multicriterio de
soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de
producto en el sector aeronáutico**

Autor: Alejandro Gómez Page

Directores:

Dr. José Ríos Chueco

Dr. Fernando Mas Morate

Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Índice general

Índice general	2
Índice de tablas	5
Índice de figuras	6
Resumen	11
Abstract	12
Capítulo 1 Introducción	13
1.1 Campo de Aplicación	13
1.2 Contexto industrial	15
1.3 El diseño de Industrialización	17
1.4 Enfoques del diseño conceptual de la Industrialización	19
1.5 Herramientas y métodos	22
1.6 Aproximación concurrente	25
1.7 Problema objetivo	26
1.8 Estructura del documento	27
Capítulo 2 Estado del arte	29
2.1 Planificación de procesos de montaje	29
2.2 Definición de líneas de montaje	34
2.3 Definición de la logística y la cadena de suministro	38
2.4 Sobre ACO o algoritmos meta heurísticos	42
2.5 Evaluaciones multicriterio	46
2.6 Estimación de costes	53
2.7 Curvas de aprendizaje	55
2.8 Conclusiones de la revisión del estado del arte	57
Capítulo 3 Alcance	59
3.1 Antecedentes	59
3.1.1 Modelo de actividades	59
3.1.2 Modelo de Información	60
3.1.3 Modelo de conocimiento de Procesos	61
3.1.4 Aplicación prototipo con definición de estructuras de producto y evaluación de repercusiones	61
3.2 Interpretación del problema	63
3.3 Aspectos innovadores de la tesis	65
3.4 Medios utilizados	67
3.4.1 Medios para la implementación	67
3.4.2 Medios para la definición de modelos	69
3.5 Resultados esperados	70
Capítulo 4 Objetivos	71
Capítulo 5 Modelos	73
5.1 Modelización del problema completo	73
5.1.1 Descomposición del problema	74
5.1.2 Condiciones iniciales del problema	79
5.1.3 Características de las soluciones factibles buscadas	80
5.1.4 Evaluación de las alternativas	81
5.1.5 Resolución	81
5.2 Meta modelo PPR	83
5.2.1 Sección de Productos	85
5.2.2 Sección de Procesos	85
5.2.3 Sección de Recursos	88
5.2.4 Sección de la cadena logística	91
5.3 Modelos específicos: Condiciones Iniciales Industriales	93
5.3.1 Diccionario PRD	93
5.3.2 Información logística	101
5.3.3 Uniones del producto	102

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

5.4 La cadena logística	104
5.4.1 Descripción.....	104
5.4.2 Elementos del problema	106
5.4.3 Cálculo de parámetros de la red logística	110
5.5 Modelo de costes y tiempos	117
5.5.1 Definiciones	117
5.5.2 Parámetros de evaluación	119
5.5.3 Gestión de la incertidumbre	123
5.5.4 Hipótesis	127
5.5.5 Reglas	128
5.5.6 Modelo de aprendizaje	133
5.6 Hipótesis generales	135
Capítulo 6 Métodos empleados	136
6.1 Optimización de Colonia de Hormigas (ACO) para la Distribución Logística	136
6.1.1 El problema de la Definición de la Distribución Logística	137
6.1.2 Resolución de problemas NP	141
6.1.3 La Optimización de Colonia de Hormigas ó ACO	144
6.1.4 Método ACO final aplicado al problema IPTP	150
6.1.5 Pruebas realizadas y configuración adoptada	164
6.2 Lógica Borrosa	169
6.2.1 La evaluación en la metodología propuesta	169
6.2.2 La lógica Borrosa	170
6.2.3 Método final desarrollado	178
Capítulo 7 Metodología Propuesta.....	186
7.1 Procedimiento	187
7.1.1 Bloques	190
7.1.2 Estados de una solución.....	191
7.1.3 Interfaz principal	192
7.1.4 Representación general	195
7.2 Bloque 0: carga de condiciones iniciales	197
7.2.1 Entradas	197
7.2.2 Salidas	197
7.2.3 Funcionalidades del Bloque	198
7.2.4 Programación.....	200
7.3 Bloque A: definición de la vista As Planned	203
7.3.1 Entradas y requisitos.....	203
7.3.2 Salidas	204
7.3.3 Funcionalidades	204
7.3.4 Programación.....	206
7.3.5 Interfaz	207
7.4 Bloque B: Definición de la línea de Montaje	209
7.4.1 Etapa 1: Secuenciación de los procesos de unión.....	212
7.4.2 Etapa 2: Definición de las estaciones de las líneas de montaje	225
7.4.3 Etapa 3: Gestión de recursos y operaciones	243
7.4.4 Etapa 4: Evaluación parcial del nodo industrial	258
7.5 Bloque C: Definición de la Distribución en Planta	263
7.5.1 Funcionalidades	264
7.5.2 Implementación	266
7.5.3 Interfaz	267
7.6 Bloque D: Definición de la logística	268
7.6.1 Entradas y requisitos.....	268
7.6.2 Salidas	269
7.6.3 Funcionalidades	269
7.6.4 Implementación	270
7.6.5 Interfaz	271
7.7 Bloque E: Evaluación	273
7.7.1 Entradas y requisitos.....	273

Índices

7.7.2 Salidas	274
7.7.1 Requerimientos de la etapa	274
7.7.2 Funcionalidades	274
7.7.3 Implementación del sistema de evaluación.....	276
Capítulo 8 Implementación	277
8.1 Modelos.....	278
8.1.1 Meta modelo	278
8.1.2 PRD.....	279
8.1.3 Información Logística.....	281
8.2 Aplicación	282
8.2.1 Medios	282
8.2.2 Programación.....	283
8.2.3 Funcionamiento	297
8.3 Representación de soluciones.....	298
8.3.1 Documento de representación general de la solución	299
8.3.2 Representación digital del proceso.....	300
8.4 Modelos específicos para casos prácticos.....	302
8.4.1 Modelo PRD definido	302
8.4.2 Modelos digitales	303
Capítulo 9 Casos de estudio	308
9.1 Definición conceptual del proceso de montaje de un componente aeronáutico.....	308
9.1.1 Condiciones iniciales y modelo del producto	308
9.1.2 Alternativas comparadas	311
9.1.3 Proceso seguido	311
9.1.4 Resultados obtenidos.....	325
9.2 Definición conceptual del proceso de montaje de un avión simplificado.....	326
9.2.1 Modelo del producto	326
9.2.2 Condiciones iniciales	327
9.2.3 Supuesto 1: Selección de la mejor alternativa para el proceso de montaje	329
9.2.4 Resultados obtenidos.....	354
9.2.5 Supuesto 2: Evaluación de cambios en una alternativa.....	355
Capítulo 10 Evaluación de objetivos.....	358
Capítulo 11 Desarrollos futuros.....	361
11.1 Relativos a funcionalidades	361
11.2 Relativos a los modelos	362
11.3 Relativos a la implementación	363
Capítulo 12 Conclusiones	364
Capítulo 13 Anexos.....	366
13.1 Modelos PPR	366
13.1.1 Diccionario PRD de ejemplo.....	366
13.1.2 Diccionario PRD empleado para casos de estudio	367
13.2 Modelos digitales	376
13.3 Sistema evaluador basado en Lógica Borrosa	378
13.3.1 Cálculo de la pertenencia de una variable con una incertidumbre asociada	378
13.3.2 Reglas del motor de inferencia	379
13.4 Casos de estudio	380
13.4.1 Soluciones de la distribución logística de las alternativas	381
Capítulo 14 Agradecimientos	387
Capítulo 15 Bibliografía	388

Índice de tablas

Tabla 1: descomposición de la operación de unión tipo metal-metal en actividades básicas, en el modelo de Más [1].....	61
Tabla 2: operaciones y recursos para uniones de tipo “Composite Components”.....	76
Tabla 3: fragmento de la definición del tipo de actividad “Mechanical joint execution”.....	87
Tabla 4: extracto de actividades compuestas del PRD definido para pruebas y casos de estudio.....	97
Tabla 5: extracto de actividades simples del PRD definido para pruebas y casos de estudio.....	98
Tabla 6: extracto de tipos de recursos del PRD definido para pruebas y casos de estudio.....	99
Tabla 7: extracto de modelos de recursos del PRD definido para pruebas y casos de estudio.....	100
Tabla 8: extracto de especialidades del PRD definido para pruebas y casos de estudio.....	100
Tabla 9: información logística acerca de las comunicaciones marítimas entre localizaciones.....	101
Tabla 10: tipo de actividad relativa al transporte completo de componentes por vía aérea, en el PRD definido.....	107
Tabla 11: variantes del transporte simple por vía aérea.....	107
Tabla 12: tipos de recurso correspondientes a medios de transporte aéreo y terrestre, y a plantas industriales.....	109
Tabla 13: Modelos de un medio de transporte aéreo, de un medio terrestre y de una planta industrial.....	109
Tabla 14: valores por defecto de algunos atributos del montaje, para el caso de estudio CU2.....	112
Tabla 15: nomenclatura para las reglas del cálculo de parámetros de la Red Logística.....	114
Tabla 16: cálculo de la densidad aparente de distintas partes del modelo producto empleado en el caso CU2.....	116
Tabla 17: nomenclatura de las reglas de cálculo de tiempos, costes, eficiencia e incertidumbre y generales.....	120
Tabla 18: valores empíricos de tiempos e incertidumbres asociadas para las actividades simples del PRD definido.....	124
Tabla 19: valores del coeficiente de aprendizaje, LCI, para los tipos de actividades simples del diccionario PRD definido para los casos de estudio.....	133
Tabla 20: nomenclatura de las reglas para el cálculo de parámetros al aplicar el método ACO.....	154
Tabla 21: Solución óptima para la estructura A.....	167
Tabla 22: Solución óptima para la estructura B.....	167
Tabla 23: configuraciones de parámetros probadas.....	167
Tabla 24: reglas del motor de inferencia del ejemplo propuesto.....	174
Tabla 25: reglas del motor de inferencia.....	184
Tabla 26: definición del tipo de unión “Fuselage-fuselage” en un diccionario PRD.....	228
Tabla 27: ejemplo de valores empíricos para la estimación de tiempos de actividades.....	246
Tabla 28: descripción de los procesos de extracción programados y momentos en que se ejecutan.....	289
Tabla 29: extracto del diccionario PRD: operaciones involucradas en las uniones de tipo FF y CC.....	309
Tabla 30: lista de localizaciones disponibles.....	310
Tabla 31: lista de componentes y nomenclatura del modelo del CU1.....	310
Tabla 32: lista de uniones del modelo del CU1.....	310
Tabla 33: solución obtenida para la distribución logística del CU1.....	314
Tabla 34: extracto del PRD: información relativa a las plantas industriales seleccionadas en el CU1.....	314
Tabla 35: resultados preliminares de las alternativas 1 y 2 con distintas configuraciones de números de turnos y optimizaciones según el tiempo.....	318
Tabla 36: resultados de las evaluaciones intermedias de los nodos de las alternativas del CU1.....	321
Tabla 37: superficie requerida por las alternativas estudiadas en el CU1.....	324
Tabla 38: resultados obtenidos para las alternativas estudiadas en el CU1.....	325
Tabla 39: lista de componentes y nomenclatura del producto del caso de estudio 2.....	327
Tabla 40: lista de uniones del producto del caso de estudio 2 y sus propiedades.....	328
Tabla 41: estructura de componentes del As Planned de la alternativa A1 del CU2.....	329
Tabla 42: estructura de componentes del As Planned de la alternativa A2 del CU2.....	329
Tabla 43: estructura de componentes del As Planned de la alternativa A3 del CU2.....	330
Tabla 44: estructura de componentes del As Planned de la alternativa A4 del CU2.....	331

Tabla 45: estructura de componentes del As Planned de la alternativa A4 del CU2.	332
Tabla 46: solución obtenida para la distribución logística de la alternativa A3 del CU2.	334
Tabla 47: estaciones, uniones que incluyen y sub montajes asociados de la FAL de la alternativa A1 del CU2.	336
Tabla 48: estaciones, uniones que incluyen y sub montajes asociados de la FAL de la alternativa A1 del CU2 (continuación).	337
Tabla 49: estaciones, uniones que incluyen y sub montajes asociados de la FAL de la alternativa A2 del CU2.	338
Tabla 50: secuencias de uniones para los distintos nodos industriales de las alternativas del CU2.	339
Tabla 51: estimaciones de tiempos en la etapa de gestión de recursos y operaciones para el CU2.	341
Tabla 52: resultados obtenidos para las dos variantes de recursos planteadas para la FAL de la A2 del CU2.	342
Tabla 53: resultados de la evaluación intermedia de los nodos de las alternativas A2 y A3 del Cu2.	344
Tabla 54: superficie requerida por las líneas diseñadas a nivel conceptual.	353
Tabla 55: resultados de ejecutar la optimización logística tras la distribución en planta, para las alternativas A2 y A3 del CU2.	354
Tabla 56: resultados de la evaluación de las alternativas del CU2.	355
Tabla 57: resultados de variar el número de turnos de una estación de la alternativa A2.	357
Tabla 58: actividades compuestas del PRD de ejemplo.	366
Tabla 59: actividades simples del PRD de ejemplo.	367
Tabla 60: recursos generales, modelos y trabajadores del PRD de ejemplo.	367
Tabla 61: actividades compuestas del PRD empleado en los casos de estudio.	371
Tabla 62: actividades simples del PRD empleado en los casos de estudio.	375
Tabla 63: modelos tridimensionales creados para representar recursos.	377
Tabla 64: reglas del motor de inferencia del sistema de Lógica Borrosa.	379
Tabla 65: tiempos y distancias entre localizaciones posibles para la red logística.	381
Tabla 66: solución obtenida para la distribución logística de la alternativa A1 del CU2.	382
Tabla 67: solución obtenida para la distribución logística de la alternativa A2 del CU2.	383
Tabla 68: solución obtenida para la distribución logística de la alternativa A3 del CU2.	384
Tabla 69: solución obtenida para la distribución logística de la alternativa A4 del CU2.	384
Tabla 70: solución obtenida para la distribución logística de la alternativa A5 del CU2.	385

Índice de figuras

Figura 1: ciclo de vida del producto y etapas de aplicación de la metodología.	14
Figura 2: línea de montaje final del Airbus A400M	15
Figura 3: descarga de componente	15
Figura 4: reparto de la producción de los componentes del Airbus A400M entre países de la UE [1].	16
Figura 5: diagrama IDEFO del flujo de trabajo para la producción de una Aeroestructura [1].	17
Figura 6: diagrama IDEFO del flujo de trabajo para el diseño y la industrialización del producto [1].	18
Figura 7: estructuras As Planned y As Prepared, y uniones de un producto sencillo con 7 componentes.	20
Figura 8: diagrama IDEFO del flujo de trabajo para la industrialización completa del producto [1].	21
Figura 9: diagrama IDEFO del flujo de trabajo para la definición conceptual del proceso de montaje [1].	22
Figura 10: uso del entorno CAD/CAM CATIA V5 para la definición en detalle de procesos de montaje.	23
Figura 11: uso del entorno CAD/CAM CATIA V5 para la definición conceptual de procesos de montaje.	23
Figura 12: entorno CATIA V5 ejecutado junto a la aplicación DPE para la definición de procesos	37
Figura 13: representación del frente de Pareto para 8 soluciones según 2 criterios: costes y tiempo.	47
Figura 14: funciones de pertenencia de tipo sigmoide [79].	48
Figura 15: Funciones de pertenencia de tipo triangular y trapezoidal [77].	48
Figura 16: tiempos requeridos para completar una tarea según el número de productos fabricados.	56
Figura 17: sección del producto del modelo de información PPR desarrollado por Más.	60
Figura 18: interfaces del prototipo demostrador de los modelos de Más [1].	62
Figura 19: representación de una solución para una instancia del problema según se propone.	63

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

Figura 20: medios para automatizar procesos en la herramienta CATIA V5 [83]	68
Figura 21: flujo para definir una solución, con la información generada en cada etapa.	75
Figura 22: secuencia propuesta para la resolución de las partes acopladas del modelo considerado para el diseño conceptual del proceso de montaje.	81
Figura 23: estructura de clases del modelo de información PPR.	84
Figura 24: correspondencia entre la sección de procesos y recursos del meta modelo y un modelo específico definido como ejemplo.	94
Figura 25: representación en el entorno CATIA V5 de la unión número 11 de las definidas para la ejecución de casos prácticos.	103
Figura 26: ejemplo de una solución para una estructura As Planned y un conjunto de localizaciones dados.	104
Figura 27: pieza LFAN1 del modelo de producto del CU2, con propiedad "Apparent Density" definida. .	115
Figura 28: representación de los tiempos en el modelo, según la hipótesis de línea síncrona.	119
Figura 29: número de estaciones, BNS, de las distintas ramas de una red logística.	130
Figura 30: correspondencia entre la vista As Planned y la red de distribución	137
Figura 31: representación del comportamiento de una colonia de hormigas para encontrar alimento. .	144
Figura 32: algoritmo de Sistema de Hormigas (AS)	147
Figura 33: algoritmo para generar la secuencia de decisiones que da lugar a una solución del IPTP.	151
Figura 34: localizaciones permitidas para elección como lugar de escala.	153
Figura 35: determinación del transporte entre dos nodos industriales ya localizados.	156
Figura 36: algoritmo general, con el cálculo del transporte dentro del bucle principal.	157
Figura 37: algoritmo de dos niveles para la definición de la red logística.	159
Figura 38: estructura A del modelo empleado para las pruebas.	166
Figura 39: estructura B del modelo empleado para las pruebas.	166
Figura 40: Puntuaciones de las 2 mejores soluciones u "hormigas" de 400 iteraciones para la estructura A del Exp. 21.	168
Figura 41: pertenencia de una variable a distintos conjuntos borrosos.	174
Figura 42: representación del proceso de desborrosificación para la variable de salida del ejemplo propuesto.	176
Figura 43: geometría y disposición de los conjuntos borrosos de entrada.	181
Figura 44: conjuntos borrosos de salida.	182
Figura 45: conjuntos borrosos y densidad de probabilidad de un parámetro de entrada.	183
Figura 46: diagrama IDEF 0 del flujo de trabajo para el diseño conceptual del proceso de montaje propuesto por Más [1].	186
Figura 47: flujo de trabajo definido en la metodología.	188
Figura 48: mapa de las interfaces desarrolladas para seguir el procedimiento.	189
Figura 49: estados de la interfaz general.	193
Figura 50: comandos de la interfaz general.	194
Figura 51: documento general de representación de una solución conceptual del proceso de montaje. .	195
Figura 52: interfaz para asistir en la definición de las uniones y creación del documento que las representa.	202
Figura 53: interfaz para la definición de la vista As Planned junto con los resultados de su aplicación. .	203
Figura 54: algoritmo para la creación de un elemento tipo Product a partir de una estructura de objetos SubAssembly y PhysicalProduct.	206
Figura 55: interfaz diseñada para la ejecución del Bloque A.	208
Figura 56: cuadro de diálogo para la selección de un nodo industrial.	209
Figura 57: definición de la línea de montaje por etapas	210
Figura 58: asistente para la definición de la línea según el grado de desarrollo.	211
Figura 59: interfaz de la etapa 1 del bloque y su correspondencia con la estructura de la vista As Prepared generada.	212
Figura 60: estaciones preliminares y productos asociados, resultantes de la ejecución de la etapa 1 del Bloque B.	216
Figura 61: diagrama de flujo para la identificación de las uniones asociadas a un sub montaje.	218
Figura 62: diagrama de flujo para identificación dl sub montaje antecesor común más cercano de dos sub montajes.	218
Figura 63: diagrama de flujo del procedimiento para establecer una secuencia, o generar la estructura de sub montajes asociada intermedia.	220

Figura 64: diagrama de flujo del procedimiento de aplicar una secuencia dada.	221
Figura 65: interfaz para la primera etapa del Bloque B	224
Figura 66: interfaz diseñada para la etapa 2 del bloque con su correspondencia con la estructura de procesos que genera y cuadro de diálogo para la gestión de actividades reiterativas.	225
Figura 67: estaciones preliminares tras completar la etapa 1 del Bloque B, con atributos y productos de la primera.	226
Figura 68: estructura de procesos de una línea de montaje tras ejecutar la Etapa 2 del Bloque B.	227
Figura 69: extracto del modelo UML referido a la parte de procesos.	229
Figura 70: definición rápida de variantes en los pasos de inicialización de la etapa 2 del Bloque B.	230
Figura 71: cuadro de diálogo para el arrastre de las operaciones posteriores a una que se ha desplazado de estación.	233
Figura 72: estructura de procesos de una estación generada en la Etapa 2 del Bloque B.	235
Figura 73: diagrama de flujo de la creación de una estructura de procesos por defecto.....	236
Figura 74: diagrama de flujo de la función recursiva para la creación de actividades.....	237
Figura 75: diagrama de flujo para creación de estaciones y sus operaciones en el entorno CATIA V5.	240
Figura 76: diagrama de flujo para la creación recursiva de actividades en el entorno a partir de una estructura de objetos de clase ActivityObject.....	241
Figura 77: interfaz desarrollada para la Etapa 2 del Bloque B.	242
Figura 78: interfaz de la etapa 3 y su correspondencia con la iDMU del proceso	244
Figura 79: forma geométrica del modelo CAD generado para los modelos que no tuvieran ninguno asignado	249
Figura 80: representación CAD de un trabajador.	249
Figura 81: actividades a las que están asignados los recursos correspondientes al trabajador técnico de logística 1 y el puente grúa BOBCs1500 1.	250
Figura 82: actividades a las que están asignados los recursos correspondientes al trabajador técnico de logística 1 y el puente grúa BOBCs1500 1, tras corregir incompatibilidades.	250
Figura 83: diagrama de flujo para el cálculo recursivo del coste de una operación.....	251
Figura 84: diagrama de flujo para la optimización según el coste.	254
Figura 85: diagrama de flujo de la selección de una variante para una actividad durante el proceso de optimización.	255
Figura 86: interfaz para la gestión de los recursos asignados y definición de las operaciones.	257
Figura 87: posicionamiento simultáneo de los elementos de una estación en una línea de montaje.....	264
Figura 88: determinación de la superficie requerida mediante modificación del perfil del elemento “suelo”.	265
Figura 89: interfaz diseñada para el Bloque C.	267
Figura 90: clases definidas para la implementación del ACO, junto con sus relaciones con otras del meta modelo.....	270
Figura 91: interfaz para la definición de localizaciones previamente a la ejecución del método ACO.	272
Figura 92: entorno de desarrollo para la implementación de la metodología.	277
Figura 93: correspondencia entre el diseño de 3 clases y la implementación de los mismos y sus relaciones.	279
Figura 94: clase LogisticInfo.	282
Figura 95: representación del proceso de desarrollo e implementación seguido.....	285
Figura 96: error de automatización de CATIA V5.	286
Figura 97: correspondencia entre los objetos con los que se trabaja y los elementos del entorno de representación.....	288
Figura 98: diagrama de flujo para la creación de los objetos Station y sus actividades hijas a partir de la estructura de procesos del documento CATProcess que representa la línea de montaje.	290
Figura 99: diagrama de flujo de la función recursiva para la creación de una estructura de actividades padre-hijas.....	291
Figura 100: propiedades de una estación en el entorno de representación.....	294
Figura 101: asistencia para autocompletar y explorador de objetos del entorno VBA.	297
Figura 102: comandos para arranque y despliegue de la aplicación prototipo y bloques B y C.	298
Figura 103: representación digital de la línea de montaje de un nodo industrial.	300
Figura 104: diagrama de Gantt del documento de representación de una línea de montaje.	301
Figura 105: modelos de producto diseñados para la ejecución del prototipo.	304
Figura 106: modelos digitales de 4 recursos.	305

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

Figura 107: dos recursos de modelos distintos representados por la misma geometría en el árbol PPR.	305
Figura 108: dos recursos del mismo tipo, representados por la misma geometría.	305
Figura 109: modelos de 4 utillajes junto con los componentes para los que están diseñados.	306
Figura 110: diseño del modelo digital de un trabajador, basado en el modelo incluido en CATIA.	307
Figura 111: modelo digital de un trabajador diseñado para la implementación, junto con el generado con el módulo específico de CATIA, respectivamente.	307
Figura 112: representación digital del producto del CU1.	310
Figura 113: vista explosionada y componentes del modelo del CU1.	310
Figura 114: maqueta digital de las líneas de montaje de las alternativas definidas en el CU1.	311
Figura 115: ejecución de la etapa inicial de la metodología para el CU1.	312
Figura 116: interfaz para definir un documento CATProcess con la información de las uniones.	312
Figura 117: definición de la estructura As Planned del CU1.	313
Figura 118: secuenciación de las uniones para la alternativa 1 del CU1.	315
Figura 119: estructuras As Prepared de ambas alternativas del CU1 y secuencia de uniones asociadas	315
Figura 120: definición de las estaciones de la línea de montaje para la alternativa 1 del CU1.	317
Figura 121: definición de operaciones y recursos para la alternativa 1 del CU1, aumento del número de turnos.	318
Figura 122: Verificación de la compatibilidad de la asignación de recursos en el CU1.	319
Figura 123: recursos distintos asignados a actividades debido a las distintas capacidades requeridas.	320
Figura 124: verificación de compatibilidad de asignación de recursos en segunda alternativa del CU1.	320
Figura 125: resultados intermedios de evaluar el nodo industrial de la segunda alternativa del CU1.	321
Figura 126: diagrama de Gantt de la línea de montaje final del la segunda alternativa el CU1.	322
Figura 127: selección de los elementos asociados a la estación 1 de la primera alternativa del CU1.	323
Figura 128: desplazamiento de los elementos de la estación 3 de la línea principal de la primera alternativa del CU1.	323
Figura 129: estimación de la superficie requerida por la alternativa 2 del UC1 mediante la generación del suelo de la planta.	323
Figura 130: distribución en planta de la línea principal de la alternativa 1 del CU1.	324
Figura 131: distribución en planta de la línea principal de la alternativa 2 del CU1.	324
Figura 132: funciones de desborrosificación de las alternativas primera y segunda, respectivamente.	325
Figura 133: vista en perspectiva del modelo del producto del CU2.	326
Figura 134: vista explosionada del producto del caso de estudio 2 con códigos de componentes.	327
Figura 135: vista explosionada del As Planned de la alternativa A2 del CU2.	330
Figura 136: vista explosionada del As Planned de la alternativa A3 del CU2.	330
Figura 137: vista explosionada del As Planned de la alternativa A4 del CU2.	331
Figura 138: vista explosionada del As Planned de la alternativa A5 del CU2.	332
Figura 139: definición de la secuencia de uniones para la FAL de la alternativa A1.	335
Figura 140: listado de estaciones con zoom en la última de la FAL de la alternativa A1 del CU2.	337
Figura 141: listado de estaciones con zoom en la segunda de la FAL de la alternativa A2 del CU2.	338
Figura 142: asignación manual del carrito "ZTroll80" a la última operación de la primera estación de la FAL de la alternativa A1 del CU2.	341
Figura 143: generación interactiva en CATIA V5 de un nuevo recurso de un modelo dado.	342
Figura 144: modelo digital del recurso "ZTroll80", de tipo "Transporter jig".	342
Figura 145: propiedades del modelo de carrito definido, incluidas en su modelo digital diseñado en CATIA V5.	343
Figura 146: visualizador de los resultados obtenidos para la FAL de la alternativa A2 del CU2.	343
Figura 147: carga de los recursos en la FAL de la alternativa A4 del CU2.	345
Figura 148: posicionamiento automático de los elementos de la planta de la FAL de la alternativa A4 del CU2.	346
Figura 149: selección de los elementos de la penúltima estación de la FAL de la alternativa A4 del CU2 para su posicionamiento.	346
Figura 150: posicionamiento de elementos de las estaciones del nodo industrial final de la alternativa A4 del CU2.	347
Figura 151: superficie estimada requerida para la línea de montaje del nodo final de la alternativa A4 del CU2.	347
Figura 152: FAL de la alternativa A1 del CU2, tras el posicionamiento automático.	348

<i>Figura 153: posicionamiento de productos y recursos de las estaciones del nodo industrial final de la alternativa A2 del CU2.</i>	349
<i>Figura 154: ajuste de la superficie requerida de la planta.</i>	349
<i>Figura 155: representación tridimensional (iDMU) del nodo industrial final de la alternativa A2</i>	350
<i>Figura 156: ajuste de la superficie para la línea de montaje del fuselaje.</i>	350
<i>Figura 157: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje del fuselaje.</i>	350
<i>Figura 158: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje de la sección de cola.</i>	351
<i>Figura 159: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje del fuselaje delantero.</i>	351
<i>Figura 160: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje dl estabilizador vertical.</i>	351
<i>Figura 161: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje estabilizador horizontal, en la alternativa A2.</i>	352
<i>Figura 162: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje del estabilizador horizontal, en la alternativa A3.</i>	352
<i>Figura 163: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje estabilizador horizontal derecho, en la alternativa A3.</i>	352
<i>Figura 164: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje del ala, en la alternativa A2.</i>	352
<i>Figura 165: representación tridimensional (iDMU) de las líneas de los submontajes que componen el ala, de la alternativa A3.</i>	353
<i>Figura 166: pertenencia a los conjuntos borrosos de salida de la puntuación de las alternativas A2 y A3, respectivamente.</i>	354
<i>Figura 167: evolución del tiempo de finalización de las líneas de montaje de los nodos de la alternativa A2, junto con la eficiencia total ponderada (verde), con el número de ciclos transcurridos.</i>	356
<i>Figura 168: evolución del coste por cada ciclo del proceso de la alternativa A2 y de su puntuación según el sistema, con el número de ciclos transcurridos.</i>	356
<i>Figura 169: Modelo anterior</i>	386

Resumen

Esta tesis doctoral tiene como principal objetivo el desarrollo de una metodología para el diseño conceptual del proceso de montaje de productos del sector aeronáutico. Para ello se ha requerido un análisis que determine la manera de definir esta etapa del ciclo de vida del producto. Partiendo de un trabajo previo de modelización de las tareas incluidas en dicha etapa, realizado por Más [1], se ha alcanzado una definición de lo que sería el problema objetivo que se busca solucionar con la metodología.

Considerando las aportaciones de Más [1] y teniendo en cuenta las aproximaciones para la asistencia a tareas relacionadas halladas en la bibliografía, se ha modelizado el diseño conceptual del proceso de montaje como el conjunto de varios problemas menores acoplados. Se trata de la distribución de la producción en nodos industriales, la definición de la línea de montaje asociada a cada nodo, el diseño de la distribución en planta de dichas líneas y la elaboración de la red logística, o determinación de la localización de cada nodo y de los medios para transportar componentes entre ellos. Además de la resolución del problema conjunto, se requeriría incluir un sistema para evaluar una solución del problema y que permita comparar posibles alternativas.

Para la elaboración de la metodología se ha revisado los enfoques de otros autores para encontrar soluciones a los distintos problemas descritos, si bien no se ha encontrado trabajos que consideren el conjunto de manera acoplada. Así, se ha definido el método a emplear para resolver cada aspecto del problema completo.

Para dar soporte a la metodología, se ha desarrollado unos modelos en los que se representa los tipos de elementos implicados en el proceso de montaje que se considera y sus relaciones. El diseño de estos modelos se ha completado partiendo de un modelo de información previo creado por Más. Éste se ha adaptado para configurar un meta modelo que permita emplear otros modelos de menor nivel, específicos de cada caso de montaje concreto y que incluyan un conjunto de clases de actividades y recursos. Los elementos contenidos en los modelos definidos han servido para construir los métodos para la resolución de los diversos aspectos del problema.

La metodología creada se compone de varios bloques, dedicados a la obtención de soluciones parciales y compatibles entre sí de las facetas del diseño del proceso de montaje planteadas y a la evaluación de cada solución completa generada. Para definir la línea de montaje de cada nodo se emplea un sistema basado en el conocimiento de la empresa relativo a los tipos de procesos implicados en cada operación de montaje básica, y los tipos de recursos requeridos para ellos. Para elaborar la red logística se emplea un método de optimización discreta meta heurística denominado Optimización por Colonia de Hormigas (ACO), que se ha utilizado en problemas análogos. El sistema de evaluación de cada solución se basa en la Teoría de la Lógica Borrosa.

Se ha desarrollado una aplicación prototipo para implementar la metodología. La programación se ha efectuado sobre el sistema de la herramienta CATIA V5/DELMIA, utilizada en la industria para tareas CAD/CAM, mediante un proyecto de automatización en VBA (Visual Basic for Applications). Finalmente, se ha ejecutado unos casos de estudio en los que se ejecuta la aplicación prototipo, se obtienen soluciones al problema del diseño conceptual del proceso de montaje y se determina la más adecuada en cada caso. Con ello se valida los objetivos de la tesis.

Abstract

The main target of this thesis is to develop a methodology to design an aerospace product assembly process, at the conceptual phase. It required an analysis of this stage within the Product Life Cycle. From a previous research that produced a model of the stage and its involved tasks, performed by Más [1], a definition of the focused problem was set.

Considering Más' contributions and some other approaches to similar tasks found in literature, a model of the problem was created. It is composed by several coupled sub problems: distributing the production between a number of industrial nodes, defining the assembly line of each of these nodes, designing the plant lay-out of them and defining the logistic net, which involves selecting the nodes locations and the transport means to communicate them. In addition, a system to evaluate a given solution of the problem and to compare several alternatives was required.

The methodology was created after a review of other authors' approaches to find single solutions to the problems mentioned above, as no joint approach was found. This review helped to define the specific method to solve each face of the problem.

Several models containing the classes of the considered involved elements were developed, in order to support the methodology. Those models were created from a previous information model created by Más. This one was adapted to build a meta model which supported the use of other lower-level models, specific of each case, that contain a set of classes of activities and resources. Elements belonging to the developed models were used to build the methods for solving the parts of the problem.

The developed methodology is composed by blocks, which are focused to find partial, suitable, solutions for the described parts of the conceptual assembly process design, and to evaluate each found complete solution. A system based on the company knowledge about types of processes, and their required types of resources, involved in each basic assembly operation is used to define the assembly line of each node. The logistic net is created by using a discrete optimization meta heuristic method, named Ant Colony Optimization (ACO), successfully used to solve similar problems. The system to evaluate a solution is based on the Fuzzy Logic theory.

A prototype application was developed to implement the methodology. The support for the programming job was CATIA V5/DELMIA system, using in Industry as a CAD/CAM tool; and the application was built by defining an automation VBA (Visual Basic for Applications) project. Finally, some case studies were carried out by executing the prototype application. Several solutions for the assembly process conceptual design were produced and, for each case, the most adequate was found between them. With that, the objectives are validated.

Capítulo 1

Introducción

En este primer capítulo de la tesis se describe el contexto general en que se enmarcan los desarrollos realizados. Se desea plantear la perspectiva del diseño del proceso de montajes que se ha seguido, y sentar las bases de las ideas que se plantearán más adelante en el documento.

En primer lugar se describirá el campo específico de Ingeniería al cual se orientan los desarrollos, el diseño conceptual del proceso de montaje. Posteriormente se planteará las características consideradas del contexto industrial del sector aeronáutico, al cual se enfoca la metodología definida. Se detallará la visión del diseño de la industrialización adoptada, y se explicará diversos enfoques del diseño del proceso de montaje, que es una sub etapa de la misma. Se comentará las principales herramientas empleadas para las etapas de diseño del ciclo de vida, y el enfoque concurrente de las mismas. Se describirá, finalmente, el problema objetivo que se busca solucionar con la ejecución de la metodología. En el último apartado se proporcionará un resumen de los contenidos del resto de capítulos del documento.

1.1 Campo de Aplicación

La metodología que se propone en esta tesis doctoral, y los desarrollos que aquí se presentan, se consideran comprendidos dentro de la Ingeniería de Fabricación. Esta disciplina trata una gran parte del ciclo de vida del producto, más allá de su fabricación estricta, incluyendo las especificaciones del producto, su diseño, su distribución o su retirada.

La metodología que se propone se enfoca a una etapa muy específica del ciclo de vida del producto. Se persigue dar asistencia al diseño conceptual de líneas de montaje, generando soluciones factibles que son evaluadas. Dicha tarea pertenece a la etapa de industrialización del producto.

La industrialización de un producto se puede considerar como la etapa en que se materializa el diseño completo del proceso de fabricación del producto, partiendo de unas ideas formalizadas en un proceso de diseño y unas especificaciones [2][3][4]. Según eso, la etapa ha de abarcar un grupo muy amplio de tareas. Los desarrollos descritos en la presente tesis se han dirigido a la parte de la industrialización relativa a la definición del proceso de montaje, a nivel conceptual.

El proceso de montaje, por su parte, también engloba una parte significativa de la producción. La metodología no pretende asistir a la totalidad de la definición del proceso de montaje, pero existen varias características específicas de este paso que afectan directamente a la forma de aplicarla. Dichas características vienen dadas principalmente por el nivel de impacto del proceso de montaje sobre toda la actividad de producción.

El proceso de montaje se considera una etapa fundamental dentro del ciclo de vida del producto, debido a su influencia sobre la calidad final del producto, el tiempo de puesta en el mercado y el coste final de la producción [1]-[7]. En proyectos de fabricación de productos aeronáuticos, se ha estimado que el montaje repercute en un 30% del coste total de la producción [7][9].

Figura 1: ciclo de vida del producto y etapas de aplicación de la metodología.

Dada la influencia del montaje sobre los resultados finales del proyecto, se puede considerar que las decisiones tomadas al definir el proceso tienen carácter estratégico, es decir, se toman a largo plazo y se les atribuye un peso importante sobre los resultados futuros de la empresa [1][9][54]. El paso del ciclo de vida en el que se toman la mayoría de estas decisiones es, precisamente, el Diseño Conceptual del Montaje [1][17], al cual se busca dar soporte mediante la metodología que se propone.

Típicamente, se cita la estimación de Burt et al., según la cual entre el 70 y el 80% del coste evitable asociado a la producción de un avión se puede controlar en la etapa de diseño conceptual de su industrialización y, una vez concluida, se considera irreversible [87].

La Figura 1 muestra una representación en el tiempo del ciclo de vida y sus fases, y muestra a qué área se enfoca la metodología. En la figura también se muestra la evolución de los beneficios a lo largo del ciclo de vida. Como se puede apreciar, durante toda la fase hacia la que se enfoca la metodología solo existe inversión o costes, dado que no aún no se está produciendo ninguna unidad. Los ingresos empiezan a generarse cuando comienza la entrada en servicio. Dado que no se ha empezado a llevar a cabo ninguna actividad de producción directa, se puede deducir que los costes incurridos se deben a tareas de adaptación de instalaciones, preparación y adquisición de recursos, lo cual viene determinado por el diseño conceptual efectuado. Ello aporta una idea de hasta qué punto la definición conceptual de la industrialización influye en los costes. Un método basado en el conocimiento permitirá acortar esta fase inicial y evitar errores aguas abajo. Los costes mencionados se conocen como costes no recurrentes [83][88].

En cuanto a los costes que se producen más adelante y son proporcionales al volumen de producción, se conocen como Costes Recurrentes [83][88] y también están fuertemente influenciados por el diseño conceptual de la industrialización, dado que ello fija los procesos y operaciones que se repetirán cíclicamente durante la fabricación.

Los desarrollos que se presentan en la tesis están centrados en el campo del diseño a nivel conceptual del proceso de montaje, y particularizados al contexto concreto del sector aeroespacial. En el siguiente apartado se detallará cómo el contexto mencionado ha implicado ciertas consideraciones adicionales al definir la metodología.

1.2 Contexto industrial

Tras exponer el campo de aplicación de la metodología propuesta dentro del ciclo de vida del producto, en este apartado se describirá el contexto específico que se ha tenido en cuenta: el sector aeroespacial de la industria.

La producción en el sector aeronáutico presenta una serie de particularidades que lo distinguen de otros sectores como la automoción, electrodomésticos o electrónica. Dichos factores implican dificultades adicionales para la industrialización de los productos del sector. Dado que la metodología está orientada a este contexto, se ha debido definir teniendo en cuenta todas las características mencionadas, que, como se discutirá en apartados posteriores, se traducen en restricciones adicionales del problema.

Una de las condiciones específicas de la producción en el sector aeroespacial es la deslocalización de las instalaciones de la línea de montaje, que en muchos casos implica el transporte de componentes distancias del orden de miles de kilómetros [15][16]. La Figura 4 muestra la distribución geográfica de la carga de trabajo de la producción de las diversas partes del modelo A400M de AIRBUS.

Otro factor diferenciador son las dimensiones del producto, mayores que la mayoría de los productos fabricados mediante una línea de montaje. Este aspecto obliga a considerar distribuciones irregulares de la línea en planta, e impone unos requisitos de espacio a las instalaciones [15][17]. Se debe tener en cuenta, además, que unas dimensiones mayores implican un peso mayor, por lo que las operaciones que impliquen un movimiento de componentes requerirán unos recursos con unas prestaciones de capacidad de carga y potencia elevadas [14]. La Figura 2 muestra los recursos e instalaciones involucrados en una línea de montaje real de una aeronave.

Si se tienen en cuenta la deslocalización de las plantas y las dimensiones de los productos intermedios a trasladar entre ellas, se puede deducir fácilmente que el transporte representará una tarea compleja. Además, debido al tipo de recursos que serán necesarios, su precio y prestaciones (medios capaces de transportar cargas de muchas toneladas entre localizaciones en distintos países; y grúas y operarios para tareas de carga y descarga), el transporte incurrirá en unos costes que tendrán un alto peso sobre la industrialización. La Figura 3 ilustra la complejidad de las operaciones de transporte de componentes de grandes dimensiones.

Por la razón expuesta, se requiere una planificación cuidadosa de la distribución logística [16]. En la metodología seguida para acometer el diseño de la industrialización en el sector, desde el principio se realiza una distribución del montaje entre distintos nodos industriales, definiendo lo que se conoce como vista As Planned del producto [16][17]. En el apartado 7.3 se profundizará más en este aspecto.

Figura 2: línea de montaje final del Airbus A400M

Figura 3: descarga de componente

Introducción

Figura 4: reparto de la producción de los componentes del Airbus A400M entre países de la UE [1].

Otra característica del diseño de la Industrialización en aeronáutica es que implica la colaboración entre un alto número de empresas de distintos países. Cada participante deberá trabajar en la producción desde su perspectiva, por lo que una aproximación desde el concepto de Ingeniería Colaborativa (principalmente accesibilidad en tiempo real a la información del ciclo de vida para todos los participantes que lo necesiten en su desempeño) se considera imprescindible [5]-[7].

La participación de actores de distintos países también tiene como consecuencia que ciertos parámetros con influencia sobre los costes del producto, como el nivel de salarios o los costes de utilización de las plantas industriales, varíen entre los centros de producción definidos según su localización en un país u otro. Dichas características se han introducido en la metodología que se propone.

Como un aspecto característico del sector para la producción en general, también se debe mencionar que se sigue de forma mayoritaria un enfoque basado en la Ingeniería Concurrente [5]-[9]. Este tipo de aproximación se debe en parte, precisamente, a las otras características específicas del sector, descritas anteriormente. Todas las complicaciones y restricciones derivadas de ello pueden ser satisfechas con mejores resultados, en términos de costes y tiempos, siguiendo el enfoque concurrente. Esto se debe a los principios en los que se fundamenta, que se describen a continuación.

La ingeniería concurrente consiste, básicamente, en la ejecución de las etapas del ciclo de vida del producto de forma solapada. Una de las ideas principales detrás del enfoque concurrente es la integración en la medida de lo posible del desarrollo del producto con el desarrollo del proceso de producción [1]-[4]. De esa forma se consigue, por ejemplo, que las necesidades de modificación del diseño del producto debido a etapas posteriores se detecten antes que siguiendo un enfoque secuencial, y puedan ser incluidas cuando aún no se ha cerrado el proceso de diseño, con lo que los costes son mucho menores [1][2][4][5]. En el apartado 1.6 se describirá la aproximación concurrente y sus implicaciones en la metodología con más detalle.

Una vez discutidas las características adicionales que el sector aeroespacial impone como contexto a la industrialización del producto, se describirá la etapa de dicho proceso a la cual se ha orientado los desarrollos que se exponen en la tesis.

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

Figura 5: diagrama IDEF0 del flujo de trabajo para la producción de una Aeroestructura [1].

1.3 El diseño de Industrialización

En este apartado se detallará el proceso de industrialización de un producto, tal y como se considera en la metodología que se propone en esta tesis. Las interpretaciones de este concepto existentes en la literatura presentan pequeñas variaciones entre sí. Para la realización de los desarrollos que se presentan, se ha partido de un trabajo previo de modelización del diseño conceptual de la industrialización llevado a cabo por Más [1], por lo que se ha seguido su interpretación, que se describe a continuación.

La palabra industrialización hace referencia a definir el proceso necesario para fabricar un producto. Se parte de información del producto, representado mediante modelos y datos, y se diseña cómo fabricar el producto físico [2]. Principalmente implica la definición de todos los procesos de fabricación requeridos para la producción industrial. La Figura 5 muestra el flujo de trabajo propuesto por Más para la producción de aeroestructuras [1].

Se observa que la industrialización se considera una etapa separada de la fabricación, y que parte de sus salidas gobiernan la ejecución física de ésta. Eso no quiere decir que exista una restricción de precedencia que obligue a terminar la industrialización antes de comenzar las etapas de la fabricación en serie, únicamente define un flujo de trabajo, con los elementos de entrada, salida, control y asistencia. De todo ello se concluye que la industrialización, junto con el diseño del producto, determina en gran medida la manera en que se ejecutará la fabricación del producto.

Según el enfoque seguido, el diseño del producto se realiza de forma concurrente con su industrialización. La Figura 6 muestra el flujo de trabajo elaborado por Más para la ejecución de los dos procesos.

Introducción

Figura 6: diagrama IDEF0 del flujo de trabajo para el diseño y la industrialización del producto [1].

La figura muestra que la fase de industrialización se ejecuta según varias salidas obtenidas del proceso de diseño del producto, como se podía prever. Pero, además, se puede observar que la industrialización obtiene una salida denominada “Requerimientos As Planned” que sirve como entrada al proceso de diseño del producto. Esta recirculación se debe a posibles cambios o mejoras que puede ser necesario aplicar al diseño y que se hayan detectado al elaborar la estructura As Planned, que consiste en una primera planificación de la actividad industrial.

Esto pone de manifiesto la importancia de la aplicación del enfoque concurrente en la producción en el sector aeronáutico. Si los procesos de la Figura 6 se ejecutasen de manera secuencial, según el flujo de trabajo discutido, el tiempo de desarrollo del proyecto se incrementaría considerablemente [89]. Se debería esperar a la finalización de todo el diseño del producto para empezar a definir su industrialización y, si los “Requerimientos As Planned” implicasen cambios en el diseño, habría que volver a ese paso y, de nuevo, esperar a su finalización. Los cambios en el diseño del producto o de su industrialización son más eficientes en coste si se realizan en las etapas conceptuales [88]-[90].

Según la definición citada, esta etapa abarca operaciones del proceso global de fabricación como el mecanizado de piezas, el moldeo o el conformado. En la práctica las empresas fabricantes de productos de cierta complejidad adquieren parte de los componentes ya fabricados por sus proveedores, o producen diferentes partes en distintas plantas, y una parte fundamental de su actividad industrial consiste en desarrollar el ensamblaje final de los mismos [2][5].

A modo de ejemplo, así sucede en el sector aeronáutico con las líneas de montaje de grandes aeroestructuras y las líneas de montaje final del avión, al mencionar en el presente documento el diseño de la industrialización de un producto se hará referencia al diseño de su proceso de montaje. Esto incluye tareas como la planificación de procesos, y la definición de la línea de montaje [2]-[6].

Por último, se desea remarcar que el proceso de montaje, al igual que un producto, también debe ser diseñado de forma meticulosa. Este proceso implica una primera etapa conceptual en la que se define su estructura fundamental, una definición detallada y una formalización. La metodología desarrollada está orientada a la fase conceptual. En el apartado 1.4 se realizará un repaso de las principales aproximaciones metodológicas al diseño conceptual de la industrialización.

1.4 Enfoques del diseño conceptual de la Industrialización

Este apartado recoge las aproximaciones más habituales halladas en la literatura para la fase conceptual del diseño de la industrialización del producto. Se debe aclarar que no se trata de metodologías detalladas como la que se propone en la tesis, sino unas directrices generales para acometer dicho proceso. En cuanto a otras metodologías detalladas, el Capítulo 2 contiene una revisión de las propuestas encontradas.

Muchos de los enfoques encontrados en la literatura se centran en la secuencia de montaje, es decir, el orden en que los componentes se van ensamblando hasta obtener el producto completo [29][31][97]-[100]. En el caso más sencillo, los primeros pasos de la definición conceptual del montaje consisten en fijar un componente base, sobre el que se montan el resto de componentes, y luego definir el orden de ensamblaje. Esa forma de proceder permite obtener los estados intermedios por los que pasa el producto (en cuanto a geometría y propiedades) y la secuencia de ejecución de las operaciones.

Para poder definir la secuencia de montaje es necesario apoyarse en el concepto de uniones entre componentes. Se trata de relaciones dos a dos entre los distintos componentes del producto que determinan cuáles se deben ensamblar entre sí. La realización de todas las uniones conduce a la obtención del producto completamente ensamblado [26][27][61]. La definición de la secuencia de montaje se puede entender también como la secuenciación de las uniones del modelo de producto.

La secuencia de montaje, o el orden de ejecución de las uniones, define los estados intermedios del producto y tiene un alto impacto en todo el proceso debido a su relación directa con el nivel de dificultad de algunas operaciones (según la accesibilidad a ciertas piezas ensambladas para un determinado estado intermedio), la fijación o utillajes necesarios, la probabilidad de que los componentes sufran daño o el coste unitario [97][98].

Para productos de cierta complejidad, el enfoque descrito puede no ser el más adecuado. Como se ha discutido en el apartado 1.2, el sector aeronáutico impone unas dificultades adicionales al proceso de industrialización, como la deslocalización de las instalaciones de la línea de montaje. La definición de la secuencia de montaje, por tanto, estará fuertemente condicionada por la distribución geográfica de las instalaciones de montaje. Por ejemplo, si se posiciona una unión entre componentes de grandes dimensiones como la primera, será necesario transportar un producto intermedio voluminoso durante el resto del proceso, lo cual seguramente se aleje de la solución óptima. La elección de un componente base sobre el que se van ensamblando el resto puede dar también malos resultados en cuanto a costes por el mismo motivo.

Existe una variante del método discutido, seguida por compañías como Airbus para la definición conceptual del proceso de montaje. La Figura 7 muestra una representación de la aplicación de este método a un producto aeronáutico simplificado: un avión de 7 piezas.

Figura 7: estructuras As Planned y As Prepared, y uniones de un producto sencillo con 7 componentes.

Según esta variante, en lugar de seleccionar un componente base, se realiza una división del producto en sub montajes, cada uno de los cuales se ensamblará en un centro de producción distinto. De esa forma se controla las implicaciones que tendrá el proceso de montaje definido sobre los requisitos logísticos, pues se conoce el producto intermedio o sub montaje saliente de cada centro o nodo industrial, y se puede determinar si su transporte es factible. Esta estructuración del producto, o nueva vista del modelo, se denomina As Planned. En el ejemplo de la Figura 7, se han definido 3 sub montajes: el fuselaje y las alas, la sección de cola y el producto completo (que existirá siempre en la estructura, por defecto)

Una vez definida la vista As Planned, se procede a definir una secuencia de ensamblaje para cada uno de los sub montajes que se han definido. Para ello también se emplea el concepto de uniones entre componentes. Cada sub montaje implica un número de uniones, por lo que su secuencia de montaje se podrá obtener realizando una ordenación de las mismas [9][17][26][61]. La estructura resultante de realizar esta ordenación se denomina vista As Prepared. En el ejemplo de la Figura 7, se ha definido para los 3 sub montajes, las secuencias de uniones (4,5), (1,2) y (6,3), respectivamente.

La variante descrita se trata de una generalización de la idea de seleccionar un componente base y secuenciar las uniones. Sencillamente, se contempla que los componentes se puedan ensamblar a distintos sub montajes, en lugar de a un único componente base. De esa forma, se puede fijar una estructura para el reparto de la carga industrial.

El trabajo de Más [1] propone una definición conceptual del proceso de montaje siguiendo el enfoque descrito: definir la estructura As Planned y posteriormente la estructura As Prepared. La Figura 8 muestra el flujo de trabajo del proceso de industrialización completo. La metodología que se propone se enfoca en la primera de las etapas del diagrama, correspondiente a la fase conceptual.

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

Figura 8: diagrama IDEFO del flujo de trabajo para la industrialización completa del producto [1].

En el diagrama se puede observar que la fase conceptual requiere una mayor cantidad de medios (lado inferior de la caja) y se ejecuta con un mayor número de reglas o restricciones (lado superior), como la estructura de diseño del producto, o vista As Designed, la estrategia industrial de la compañía y sus procedimientos y métodos propios. Eso se debe a que una vez se complete la fase, el proceso de montaje estará fijado en gran medida, por lo que el impacto sobre el proyecto es muy alto.

Entre los medios que dan soporte a la definición conceptual, se pueden encontrar sistemas basados en el conocimiento (KBE), de gestión de los datos del producto (PDM), asistidos por ordenador (CAx), métodos de ingeniería concurrente y evaluadores. Los desarrollos que se presentan en esta tesis serían un medio más para asistir a la realización de esta etapa.

La Figura 9 muestra el diagrama interno de la fase conceptual. Según el diagrama, primero se realiza la definición de la estructura As Planned, después la generación de la línea de montaje, lo que incluye definir la estructura As Prepared, así como preseleccionar unos recursos, utillajes, recursos humanos y medios industriales; y finalmente se evalúan las soluciones encontradas para determinar la mejor.

En el diagrama se puede encontrar una recirculación desde la generación de la línea de montaje a la definición de la vista As Planned, y otra que llega hasta aquella desde la evaluación de soluciones. La razón de estas realimentaciones es la incorporación de cambios y mejoras a etapas previas. Se considera, por tanto, que la etapa conceptual a la que se dirige la metodología es un proceso que se puede realizar de manera iterativa, buscando soluciones cada vez mejores.

Las salidas del sistema son, por un lado, la estructura As Prepared resultante y los medios requeridos para las tareas de montaje. Por otro lado, también se producen unos requerimientos de la vista As Planned, que podrán repercutir en cambios el diseño del producto.

Figura 9: diagrama IDEF0 del flujo de trabajo para la definición conceptual del proceso de montaje [1].

Se ha descrito la forma de entender en la metodología el diseño conceptual de la industrialización del producto en el sector aeroespacial. Esta visión se basa, por tanto, en una definición inicial de la secuencia de montaje en dos pasos, definición de la estructura As Planned y de la estructura As Prepared, la generación de la línea a partir de ellas y una evaluación de las soluciones, todo ello en un proceso con realimentaciones para incluir mejoras o correcciones.

En el apartado 1.5 se describirá las herramientas existentes para la definición conceptual del proceso de montaje, dado que la metodología desarrollada se puede entender como un media más para dar asistencia a dicha etapa.

1.5 Herramientas y métodos

En el apartado 1.4 se ha mencionado diversos medios para asistir a la etapa de diseño conceptual del proceso de montaje, según el enfoque planteado por Más [1]. Todos los medios enumerados se utilizan actualmente para el diseño del producto y de su industrialización, y están relacionados con la metodología que se propone, bien porque se han utilizado para su desarrollo o implementación, o sencillamente porque se ha tenido en cuenta la forma en que se emplean para resolver problemas similares.

El primer tipo de medios que se ha destacado para el diseño de la industrialización son los sistemas PDM, es decir, de gestión de datos del producto. Se trata de sistemas complejos que se apoyan en una base de datos y tienen la función de almacenar, organizar y posibilitar el acceso a toda la información relativa al producto. Esta información incluye modelos CAD, planos, especificaciones, informes, simulaciones, procesos de fabricación y cualquier otro objeto que contenga datos relacionados con cualquier etapa del ciclo de vida[11]-[13].

Diversos autores consideran que las herramientas PDM aportan una gestión integrada de todos los datos de los distintos ámbitos de la producción, como diseño del producto, de procesos, diagramas de sistemas internos del producto, lista de clientes y proveedores, por lo que se consideran de gran utilidad para el desarrollo del producto[5][18][19].

Los sistemas PDM han evolucionado a lo que se conoce como PLM, es decir, gestión del ciclo de vida del producto. Esta nueva generación incluye las funciones de sus predecesores, en cuanto a gestión de la información del producto, además de la posibilidad de la ejecución de aplicaciones que pueden generar y modificar los distintos tipos de información con los que se trabaja. Dichas aplicaciones están integradas en el sistema, tienen acceso a cualquier dato almacenado que pueda ser útil; y dado que sus usos abarcan las distintas fases del ciclo de vida, o al menos la definición de éstas, se adoptó el nombre de PLM. Por ejemplo, un sistema PLM teóricamente podría permitir acceder a archivos CAD de componentes del producto para modificarlos y, desde ahí, acceder a los archivos de definición de su proceso de fabricación y simulaciones del mismo, para actualizar los cambios.

Las herramientas PLM tienen gran importancia en desarrollo del producto por lo extendido de su uso y las utilidades que integran para la definición de etapas de todo el ciclo de vida del producto. Se consideran fundamentales para desarrollar un producto según el enfoque concurrente [2][6][7].

De entre las aplicaciones que se engloban dentro de los sistemas PLM, según su definición teórica, cabe destacar las de tipo CAD y CAM, es decir, de diseño asistido por ordenador y fabricación asistida por ordenador, respectivamente. Los autores de los trabajos revisados consideran a estas aplicaciones imprescindibles en el desarrollo del producto, dado que posibilitan al diseñador la definición digital de productos, procesos y recursos[18][19].

La Figura 10 y la Figura 11 ilustran la utilización de las aplicaciones descritas para la definición del proceso de montaje. Se observa que la primera se trata de la definición detallada del proceso de montaje, mientras que el segundo caso se corresponde con un diseño de la industrialización en una fase con un nivel de detalle puramente conceptual. En ambos casos queda patente el potencial de la herramienta para la representación de productos y recursos, incluyendo su geometría y su estructura de componentes.

Figura 10: uso del entorno CAD/CAM CATIA V5 para la definición en detalle de procesos de montaje.

Figura 11: uso del entorno CAD/CAM CATIA V5 para la definición conceptual de procesos de montaje.

El uso de las aplicaciones CAD/CAM y de fabricación digital posibilita la explotación del concepto de Maqueta Digital Industrial (iDMU), que consiste en la representación y verificación, mediante modelos 3D de productos, recursos e instalaciones y modelos de procesos de montaje, de la totalidad o parte de la línea de montaje en un entorno tridimensional o 3D[90]. El uso de una iDMU facilita el diseño de industrialización y posibilita la ingeniería concurrente y colaborativa, pues permite el desarrollo paralelo del diseño funcional e industrial[8].

Sin embargo, las utilidades CAD/CAM aún adolecen de ciertas funcionalidades para una mejor aplicación industrial. El apoyo para la definición de distintos escenarios es una de ellas, pues tradicionalmente estas herramientas se enfocan en definir cada posibilidad por separado, en lugar de facilitar la exploración de diversas alternativas y proveer de medios para compararlas [7][16].

Además se ha valorado que sería útil un enfoque de la industrialización ya desde fases de desarrollo del producto muy tempranas [7].

Las aplicaciones CAD/CAM tampoco van acompañados de una metodología. La manera de acometer tareas sobre cómo diseñar el producto o los procesos depende de cada usuario[18]. Por esta razón se considera que la aportación de la metodología propuesta en la tesis es interesante, dadas las limitaciones comentadas de las aplicaciones CAD/CAM.

Por último, se ha discutido que los sistemas CAD/CAM comerciales no proveen medios para capturar o reutilizar el conocimiento para mejorar la ejecución de las diversas tareas [19]. Cabe destacar que algunos sistemas incluyen módulos para la definición y utilización de conocimiento, aunque no facilitan la definición ni el uso de un modelo teórico de conocimiento relativo al producto, sino que se usan principalmente para la definición de reglas y procedimientos que permitan agilizar algunas tareas repetitivas [17]-[20].

Para implementar la metodología desarrollada, se ha empleado el entorno CAD/CAM CATIA/DELMIA V5, utilizado ampliamente en la industria. Se ha realizado la implementación del sistema propuesto aprovechando la ventaja de la facilidad de representación de productos y recursos. Se puede concluir respecto a las aplicaciones CAD/CAM, al menos para el caso de CATIA/DELMIA V5, que adolecen de una metodología que facilite su utilización en las distintas fases de desarrollo del producto, pero son adecuadas como plataforma para el desarrollo de ese tipo de propuestas.

Según el enfoque seguido, propuesto por Más [1], también se incluye a los sistemas KBE, de ingeniería basada en el conocimiento, como medios aplicables para completar la definición conceptual del montaje. Los métodos basados en el conocimiento principalmente buscan automatizar, utilizando la experiencia obtenida de proyectos similares, ciertos procesos de una actividad de diseño; tienen el objetivo de facilitar la labor del desarrollador, ahorrándole tiempo en tareas que no aportan auténtico valor al diseño para que se pueda centrar en las que sí lo hacen [10][18]-[20].

Se debe reconocer el potencial de los sistemas basados en el conocimiento para la asistencia al diseño de la industrialización, más aún cuando muchos aspectos de los desarrollos pueden tener dicha consideración. Sin embargo el enfoque usado como fuente de partida no plantea un sistema KBE concreto, por lo que la estructura interna que este pueda tener queda abierta a cada caso concreto de desarrollo.

También se plantea los sistemas basados en la ingeniería concurrente como herramientas de asistencia al diseño de la industrialización. Se considera que los recursos que faciliten la ingeniería concurrente son adecuados, especialmente para las etapas del ciclo de vida que implican un proceso de diseño, o están relacionadas con alguno. La aproximación desde el

punto de vista de la ingeniería concurrente, y sus implicaciones sobre los desarrollos que se proponen, se describirá en el apartado 1.6.

Por otro lado, existen métodos para acometer las tareas de las distintas etapas del diseño conceptual de la industrialización. Se ha revisado metodologías desarrolladas para los problemas de ingeniería asociados, como la definición de la línea de montaje[9][10][16][20][21] o la planificación logística[6][17]. Debido a la complejidad de cada problema, habitualmente se abordan por separado, aunque se ha encontrado propuestas en las que se integraban varios aspectos diferenciados del diseño de la industrialización, principalmente para definir la cadena de suministro o la red de distribución en conjunto con algún otro aspecto de la producción [44][51][63].

La mayoría de los métodos desarrollados para asistir en la definición del montaje no se han enfocado para su uso en conjunto con herramientas CAD/CAM. De ello se puede deducir que no aprovechan la ventaja del uso de ese tipo de aplicaciones, principalmente en relación con la representación 3D de productos, procesos y recursos. Por lo tanto, existe un margen para la mejora en este aspecto.

Como conclusión del apartado, se puede argumentar que el conjunto de medios utilizados para el diseño conceptual de industrialización no incluye ninguna metodología específica que permita la obtención de soluciones de calidad para dicho problema de diseño. En cuanto a los medios desarrollados por otros autores, ninguno incorpora una visión global del problema al que se orienta la metodología propuesta, ni suelen aprovechar la potencia de las herramientas CAD/CAM. Por tanto, se puede deducir que la aplicación de los desarrollos que se plantean puede suponer una mejora en esta área, siempre que cumpla los objetivos definidos, que se detallarán en el Capítulo 4.

1.6 Aproximación concurrente

En el apartado anterior se menciona la Ingeniería Concurrente (IC) como medio para un adecuado diseño de la Industrialización. Dado que es éste el campo de aplicación de la metodología desarrollada, se comentará en qué consiste el enfoque basado en la IC en la producción.

La IC consiste en simultanear o solapar etapas del ciclo de vida del producto. Una de las ideas principales del enfoque concurrente es la integración en la medida de lo posible del desarrollo del producto con el desarrollo del proceso de producción [1]-[4]. En otras palabras, comenzar el diseño de industrialización lo antes posible, antes de que se concluya el diseño funcional del producto

Una consecuencia de diseñar la industrialización de forma concurrente con el producto consiste en que cualquier cambio que se juzgue necesario en el diseño se puede implementar cuando aún se está en fases tempranas de desarrollo, por lo que el coste es asumible. Así se previenen los cambios en fases más tardías, que pueden suponer costes prohibitivos [1][2][4][5][8].

Por tanto, el número de prototipos requeridos disminuye respecto al enfoque de ingeniería secuencial, dado que los cambios a realizar en los mismos son principalmente ajustes o cambios menores [89]. Así uno de los beneficios encontrados al implementar la IC es la bajada del coste de la producción [2]-[5][89].

El empleo de la IC también repercute favorablemente en la calidad del producto, puesto que propicia el trabajo colaborativo entre personas de distintas disciplinas involucradas en el desarrollo del producto [2]-[4][89].

Sin embargo, probablemente la razón de mayor peso por la que las empresas han adoptado la IC sea disminuir el tiempo de salida al mercado del producto. La ejecución de forma concurrente de tareas del desarrollo del producto acorta dicha etapa y, como se ha mencionado, evita grandes cambios en etapas posteriores, por lo que el producto alcanza antes la fecha de salida a la venta. Ello aporta una ventaja competitiva y facilita el posicionamiento en el mercado [2][88][89].

La adopción de un enfoque basado en la IC también plantea dificultades. Uno de los retos de implementar la IC es cómo tomar decisiones sobre la industrialización cuando el producto está en una fase temprana de desarrollo. Para los autores esto requiere una gestión del conocimiento relacionado con las etapas a solapar así como un intercambio de información entre las partes implicadas [2][4]. Para ello, se requiere una adecuada infraestructura de información y un acceso compartido a ella por parte de los participantes[88][89].

La IC ha desplazado a la ingeniería tradicional, pero aún existe margen de mejora. El siguiente paso es una mayor integración entre etapas, de forma que se ideen en conjunto y empleando las mismas herramientas. Esto daría como resultado la Ingeniería Colaborativa[3].

La Ingeniería Colaborativa se basa en establecer un sistema de comunicación entre los participantes en el proyecto que les permita trabajar de forma conjunta. Así, un equipo multidisciplinar persigue un objetivo global y se cuenta con el punto de vista de todos los implicados [3][4]. El acceso compartido a la información generada en tareas individuales de cada disciplina redundará en un mayor control y facilidad en la toma de decisiones [88].

Se puede concluir, por tanto, que la IC es un enfoque seguido de manera muy extendida en la industria, dados sus potenciales beneficios, y que el concepto se ha desarrollado hasta alcanzar la denominada ingeniería colaborativa. Cualquier metodología enmarcada dentro del diseño de la industrialización, que pertenece a las fases de desarrollo del producto, deberá tener en cuenta ambas ideas.

La metodología que se propone no integra tareas relativas al diseño del producto con tareas del diseño de su industrialización. Sin embargo sí se puede considerar adecuada en organizaciones con un enfoque concurrente, puesto que permite definir aspectos del proceso de montaje cuando el diseño de producto aún está en una fase preliminar.

1.7 Problema objetivo

Se ha definido la tarea del ciclo de vida a la que se busca asistir mediante la aplicación de la metodología que se propone: el diseño de industrialización del producto en fase conceptual. Sin embargo, puede haber muchas variaciones en la forma de entender dicha tarea, dependerá del sector de la industria y, para un mismo sector, de las motivaciones del autor de cada modelo. La metodología se ha diseñado para encontrar soluciones de calidad (es decir, cercanas al óptimo) para una modelización concreta del diseño de industrialización que conforma el problema objetivo de los desarrollos.

El problema objetivo considerado se compone de varios sub problemas acoplados, es decir, cuyas soluciones individuales afectan al resto. Para hallar una solución al problema, se partirá de un modelo de producto con un número de componentes y unas condiciones iniciales definidas, principalmente, por un conocimiento sobre los procesos industriales y los recursos asociados y una lista de recursos disponibles. El problema se resolverá definiendo una estructura de fabricación As Planned del producto, definiendo la línea de montaje de cada sub montaje en que se divide dicha estructura, asignando cada línea a una planta industrial adecuada y definiendo la manera de transportar los productos intermedios correspondientes de una planta a otra.

La ejecución de las tareas enumeradas conducirá a la obtención de una solución, cuya factibilidad se garantiza mediante unas restricciones incluidas en el sistema. El problema también incluye evaluar cada solución obtenida de forma que se pueda determinar cuál es la más adecuada.

El proceso descrito para definir soluciones al problema es equivalente a la definición de la secuencia de montaje, la planificación de procesos, la definición de la línea, el diseño del Lay-Out de la planta y la definición de la red logística, según la terminología empleada en la literatura.

Se ha descrito, por tanto, el problema que se pretende resolver mediante la metodología, o la forma en que se ha modelizado el diseño conceptual de la industrialización según el enfoque propuesto. En el apartado 3.2 se explicará de forma más detallada esta interpretación y en el 5.1 se describirá el modelo final del problema.

1.8 Estructura del documento

La presente tesis doctoral busca presentar de forma clara y detallada una metodología desarrollada para el diseño conceptual del proceso de montaje de productos del sector aeronáutico, según una modelización propuesta para dicho problema. Para una mejor organización de los contenidos se ha optado por una estructura dividida en 15 capítulos, buscando que cada uno trate una parte concreta de los desarrollos. A continuación se describirá el contenido de cada uno, tras estos dos primeros, de resumen e introducción, respectivamente.

En el Capítulo 2 se realiza una descripción de la revisión bibliográfica realizada sobre distintos aspectos relacionados con la tesis, otras soluciones desarrolladas para el tipo de problemas que trata la metodología y aplicaciones de los métodos implementados a otros problemas distintos, del ámbito de la ingeniería de fabricación y de otros. Se ha buscado presentar un extracto del estado del arte que permita al lector hacerse una idea de los desarrollos existentes y encuadrar de manera adecuada los aspectos innovadores de la tesis, que se describen posteriormente.

El Capítulo 3 plantea el alcance de los trabajos realizados. Se entiende alcance como el punto que se ha buscado alcanzar, la forma en que se ha acotado los desarrollos, pues siempre existirán formas de mejorarlos y ampliarlos. Para reflejar eso, es fundamental plasmar la interpretación que se le ha dado al problema que se busca solucionar. Además, el alcance debe incluir el punto de partida, dado que la metodología se ha construido a partir de otros trabajos, y las aportaciones y aspectos innovadores de la tesis, que han permitido alcanzar los objetivos desde dicho punto de partida.

En el Capítulo 4 se enumera los objetivos perseguidos con los desarrollos realizados, y se explica de forma concisa cada uno.

A partir del Capítulo 5 se empieza a detallar las características de la metodología desarrollada. En este primer capítulo se describe los modelos definidos y adaptados que han sido necesarios para la definición y la aplicación de la metodología. Se comienza con el problema que se busca resolver, y se continúa con el modelo de información que se ha adaptado de trabajos previos, los modelos concretos de actividades y recursos, el modelo de distribución logística, el modelo de tiempos y costes y el de gestión de la incertidumbre.

El Capítulo 6 contiene una explicación detallada de los métodos ya existentes que se han implementado en la metodología, la optimización meta heurística de Colonia de Hormigas para la definición de la red logística y el algoritmo de lógica borrosa para evaluar las soluciones generadas. En ambos casos se ha comenzado describiendo la parte del problema a la que se aplican, se ha justificado su empleo, se ha explicado brevemente el origen y la teoría básica de cada método y finalmente se ha presentado la implementación realizada, incluyendo sus características específicas y variaciones frente al enfoque estándar del método.

El Capítulo 7 recoge los procedimientos que componen la aplicación de la metodología. Los apartados del capítulo se corresponden con los distintos bloques definidos. Todo ello precedido de una descripción global, en la que se incluye una descripción de los procedimientos planteados en los trabajos previos, sobre los que se apoya la metodología.

En el Capítulo 8 se explica la manera en que se ha implementado toda la metodología, incluyendo sus modelos y procedimientos, para la creación de una aplicación prototipo demostradora de la validez de los desarrollos. Asimismo se especifica qué aspectos pertenecientes a la metodología no se han implementado en el prototipo, debido a que no están asociados con ninguna característica que suponga un valor añadido.

El Capítulo 9 recoge dos casos de estudio de la ejecución de la metodología. Con ello se pretende demostrar la funcionalidad del prototipo de aplicación, con lo que se busca probar la validez de los desarrollos. Se describe el producto que se ha empleado para cada caso de estudio, se detalla la aplicación de la metodología sobre él y se presentan y analizan los resultados en cada caso.

En el Capítulo 10 se realiza una evaluación del grado de cumplimiento de cada objetivo planteado en el capítulo correspondiente, y se proporciona una valoración global del trabajo realizado hasta la elaboración de la presente tesis.

En el Capítulo 11 se ha incluido una lista de posibles mejoras a la metodología presentada y se proponen algunas líneas de investigación que no se han seguido pero se consideran interesantes para continuar con los desarrollos, bien porque no se dispuso del tiempo ni los medios o porque desde el principio se encontraban fuera del alcance.

Las conclusiones de toda la tesis se encuentran en el Capítulo 12. Se realiza un análisis del desempeño de la aplicación prototipo, y de los resultados obtenidos en los casos de estudio.

El Capítulo 13 incluye la documentación generada durante la ejecución de la tesis, pero que no se ha estimado que implique ninguna aportación de relevancia, por lo que no se ha incluido en el resto del texto. El capítulo incluye figuras, diagramas de flujo y algunas ecuaciones.

Los agradecimientos se han incluido en el Capítulo 14.

Finalmente, el Capítulo 15 contiene todas las referencias de los trabajos del estado del arte que se han revisado.

Capítulo 2

Estado del arte

Este capítulo recoge la revisión que se hizo del estado del arte, según la literatura existente en los diversos campos relacionados con la metodología que se ha desarrollado. Dado que se considera el diseño industrial conceptual un problema compuesto por partes que pertenecen a diversos dominios, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica de cada uno de los ámbitos del diseño de industrialización implicados.

Se comenzará con la revisión del estado del arte en la planificación de procesos, etapa en la que se definen las operaciones de montaje necesarias y su secuencia de realización. Dicha etapa equivale, según el enfoque adoptado, con la definición de las estructuras As Planned y As Prepared.

El siguiente apartado incluye una revisión de las principales aportaciones en el campo de la definición de la línea de montaje. Principalmente se describe cómo los distintos autores plantean la separación de las operaciones de montaje en estaciones y la asignación de recursos.

En el tercer apartado se revisará la bibliografía relativa a lo que se ha denominado red logística en la presente tesis, y cuya definición constituye una de las partes del problema objetivo. Se ha consultado también trabajos relacionados con la definición y evaluación de aspectos equivalentes o similares, como la cadena de suministro o la red de distribución.

Dado que la optimización de la red logística se define en la metodología como un problema de optimización combinatoria de tipo NP, se incluirá también una revisión de la literatura acerca de los métodos existentes para la resolución de ese tipo de problemas, de tipo meta heurístico.

En el siguiente apartado se detallará el estado del arte en cuanto a los sistemas de evaluación multicriterio, puesto que la metodología implica una evaluación de las soluciones factibles encontradas según diversos parámetros.

Finalmente se incluye una revisión de la bibliografía relacionada con la modelización, evaluación y estimación de costes de actividades de producción.

Las conclusiones de la revisión de los trabajos de cada campo se recopilarán en un último apartado.

2.1 Planificación de procesos de montaje

En la literatura, se entiende este término como la etapa del diseño del proceso de montaje de un producto en el que se determinan qué operaciones se deben completar y en qué orden para realizar el ensamblado del producto [17][26]-[35][61]. Según el enfoque adoptado al definir la metodología, la etapa se correspondería con las primeras tareas del diseño conceptual de industrialización, sin incluir la generación de la línea de montaje [1].

El planteamiento que se propone en este trabajo del problema de la definición conceptual del proceso de montaje incluye, como una de las primeras fases, la determinación de las operaciones generales requeridas y su secuenciación.

En el apartado 1.4 se discutió que el enfoque seguido en el sector aeronáutico consiste en considerar que la planificación del proceso de montaje comienza con la definición de dos estructuras de producto, As Planned y As Prepared, que describen, respectivamente, los subconjuntos de componentes que conformarán el producto completo y el orden en que se ensamblarán para dar lugar a los subconjuntos mayores y al producto completo [1][6][9][17].

Este enfoque coincide con el de diversos autores [26]-[28][61] en dividir la planificación básica de procesos en dos problemas, la definición de subconjuntos del producto y la definición de la secuencia de montaje según la cual los componentes van siendo ensamblados al conjunto. Otras propuestas plantean una línea de actuación más simple, en la que se selecciona un componente base, sobre el que se van ensamblando los demás, por lo que la definición de la secuencia se puede realizar de manera más sencilla [29][31].

El problema de definir la secuencia de montaje es equivalente a desarrollar un proceso de desmontaje factible del producto y luego invertir el orden. Este enfoque se denomina Montaje a través del Desmontaje. Las restricciones de precedencia son más fácilmente implementables. Las de carácter físico se manifiestan como colisiones entre componentes cuando se intentan “desensamblar” según secuencias no factibles [28][29][61]. Estas colisiones pueden ser detectadas según numerosos métodos ya implementados en los sistemas CAM actuales [27][30][61].

Morato et al. utilizan el Montaje a través de Desmontaje. Según su método, los subconjuntos se definen por proximidad entre las piezas. Las secuencias factibles se generan automáticamente, evaluando los subconjuntos que pueden ser desmontados en cada paso. Para limitar el número de soluciones se asume que cada operación sólo une dos conjuntos de piezas y que existe un componente base sobre el que se ensamblará el resto [27].

La propuesta consistente en definir el montaje a través del desmontaje e identificar secuencias no factibles mediante las colisiones es interesante para futuros desarrollos. En la metodología propuesta no se incorpora ningún sistema que detecte incompatibilidades físicas en las secuencias de ejecución de las uniones. Se plantea como desarrollo futuro.

Sí se ha incluido la idea de partir del producto ensamblado para desarrollar la estructura de la vista As Planned, ya que es más sencillo definir los sub montajes partiendo del conjunto completo del producto e irlo subdividiendo. Las restricciones debidas a dimensiones o peso máximo de un producto a transportar pueden incluirse más fácilmente, en cuanto se define un submontaje que lo sobrepasa, puede aparecer un mensaje de aviso y no permitirse.

Siguiendo esta línea, Boër et al. plantean de forma teórica un entorno software para el diseño asistido por ordenador de un sistema de montaje modular. El objetivo es desarrollar sistemas con un alto grado de flexibilidad, para fabricar cualquier producto con modificaciones mínimas: adaptando los ciclos, con cambios menores en fijaciones y utillajes y evitando rediseños de las células de montaje. Proponen una base de conocimiento para definir el plan de montaje alcanzando varios hitos. Se identifican las restricciones de precedencia y se definen unas uniones entre piezas con un nivel de prioridad según la información disponible. Posteriormente se recogen las secuencias factibles y el usuario debe seleccionar una de ellas, comenzando por elegir un componente base [32]. La definición de la secuencia de montaje en la metodología es similar, pues la realiza el usuario, pero sólo tomando decisiones en los puntos donde la estructura As Planned deja varias posibilidades.

Dèmoly et al. han desarrollado una interfaz colaborativa para tareas del ciclo de vida entre las que se encuentra el diseño del proceso de montaje [26][30]. Para la planificación de la secuencia de montaje plantean también un conjunto de uniones entre componentes, en este caso de diversas clases: según contacto, funcionalidades compartidas y operaciones. Según los enlaces y la estructura del producto se generan todas las secuencias factibles y se selecciona

una atendiendo al tiempo de ciclo máximo permitido, dado por el tiempo disponible y la demanda [26].

Yang et al. se apoyan también en las uniones entre componentes, aunque abordan el problema de otra forma. Las uniones se basan en restricciones geométricas del producto completo. A través de un modelo semántico dichas restricciones se relacionan con uniones industriales realizables mediante la ejecución de tareas básicas (por ejemplo atornillar equivale a aproximar útil, fijarlo y girarlo en un sentido). Las operaciones básicas están a su vez relacionadas con simulaciones obtenidas por captura de movimiento. El resultado final es un plan de procesos que puede ser simulado en detalle para examinar las secuencias posibles y seleccionar la más conveniente [33].

De Fazio et. al. proponen la generación de todas las secuencias de montaje factibles mediante la aplicación del método Bourjault. Se definiría un algoritmo de reglas obtenidas a partir de preguntas de la forma “¿La unión L_i se puede ejecutar si las uniones L_j y L_k (aún no) se han efectuado?”. Estas reglas se usan para restringir el proceso automático de generación de todas las secuencias factibles [110].

Kashkoush et. al. utilizan una representación de la estructura de montaje similar a la vista As Prepared, el Árbol de raíces binarias, en la que cualquier subconjunto de piezas o nodo sólo puede tener dos hijos, correspondientes a las dos partes de la unión que lo generó. A partir de los árboles de un número de productos de la misma familia de productos, los autores proponen la determinación de un árbol de consenso que minimice la suma de la distancia generalizada hasta ellos. A partir de dicho árbol de consenso se podría reducir el número de soluciones posibles para hallar el árbol de cualquier otro producto de la familia [97].

Yee et. al. plantean emplear una Red de Petri para generar todas las posibles secuencias de montaje aplicando el método heurística de Optimización por Sub Gradiente. Se busca minimizar el tiempo o el coste y se imponen restricciones que garanticen el fácil manejo de componentes (teniendo en cuenta el peso total), la facilidad para realizar la unión (reduciendo el número de cambios de dirección en las operaciones) y reducir el número de cambios de herramienta [99].

Los sistemas descritos buscan la secuencia óptima de montaje mediante el análisis de todo el espacio de soluciones, en lo que se conoce como búsqueda de la solución exacta. No tienen en cuenta que, debido a las características matemáticas del problema, el número de soluciones aumenta a ritmo exponencial o mayor, y hace su resolución prohibitiva según este método a causa del tiempo de procesamiento requerido [36][38]. Este fenómeno se conoce como explosión combinatoria. Para lidiar con ello, la justificación habitual es que el espacio de soluciones está limitado por restricciones de precedencia y tecnológicas [26][27][31][32]. Sin embargo, sigue existiendo este riesgo para casos de productos con alto número de componentes. La metodología propuesta integra algoritmos de búsqueda de soluciones que evitan este problema, como los que se describe a continuación.

Huang et al. analizan el obstáculo de la explosión combinatoria. Consideran que los problemas relacionados se pueden resolver empleando métodos meta heurísticos, con el inconveniente de que se puede pasar por alto la solución óptima. A su vez propone un método que genera una única solución realizando una evaluación previa a cada paso. Se comprueba la factibilidad y se evalúa la calidad de cada posible decisión considerando la complejidad de las trayectorias y la fijación de las piezas, el tiempo requerido para cambios de herramientas y el número de reposicionamientos de piezas necesarios [28].

Wang et al. han implementado un método meta heurístico denominado “Optimización de Colonia de Hormigas” para la definición de los sub montajes intermedios y la determinación de la secuencia de montaje. Los autores plantean ambos problemas de forma acoplada y se

apoyan entre las uniones entre los componentes del producto para la limitación del espacio de soluciones. Se busca una optimización del coste asociado [61].

Motavalli et. al. han implementado el método heurístico de Recocido Simulado para la definición de la secuencia de montaje, buscando minimizar el tiempo de montaje total y el número de reposicionamientos del producto necesarios. El método busca soluciones a partir de modificar el estado actual, con una intensidad proporcional a un valor que disminuye progresivamente, análogo a la temperatura de un metal en solidificación [108].

Otros autores han abordado la planificación de procesos de montaje desde un punto de vista integrado. Ming et al. inciden en el aspecto colaborativo del ciclo de vida para adoptar soluciones de producción competitivas. Identifican barreras para la colaboración y plantean los sistemas CAX como herramientas para vencerlas, aunque con el inconveniente de que están demasiado compartimentados, dado que cada uno sólo es manejable por personas con un perfil concreto, como diseñadores o ingenieros de procesos [4].

Los autores de la bibliografía proponen la integración de la planificación de procesos y la fabricación mediante un sistema que represente un puente entre los módulos CAPP (Computer Aided Process Planning) y CAM. Para ello un requisito es el intercambio de información entre dichos sistemas junto con sistemas CAD [4][101]. La metodología propuesta se enmarca también entre estos dos conjuntos de aplicaciones, CAPP y CAM. El intercambio de información con los modelos CAD de productos y recursos será imprescindible.

Liao et al. califican los sistemas CAPP como necesarios para aumentar la productividad, reducir el tiempo de salida al mercado y facilitar la Ingeniería Concurrente. Plantean como requisitos para este tipo de sistemas un modelo de representación de la estructura de montaje, un método de generación de secuencias de montaje y una plataforma y lenguaje donde implementarlos. Han desarrollado el Sistema de Grafos Dirigidos Acíclicos por Capas con Atributos o LADGA. Según este modelo, se representan los componentes como nodos y las relaciones de precedencia para su ensamblado como grafos. Se incluyen además atributos como el tipo de operaciones requeridas para su inclusión y la dirección de unión. Como sistema generador, han desarrollado un algoritmo que determina las posibles secuencias de montaje que respetan las restricciones tecnológicas obtenidas del modelo de producto representado mediante LADGA [101].

Bowland et al. también plantean un enfoque integrado. Como carencias de los sistemas de Planificación de Procesos de Montaje Asistida por Ordenador, identifican la falta de medios para definir la distribución en planta y de selección de procesos. Proponen un esquema que implica sistemas PDM y CAD para definir la secuencia de montaje y el plan de procesos asociado. Es el usuario el que define interactivamente las uniones entre componentes y la estructura de sub montajes. Se generan automáticamente todas las secuencias de montaje de forma recursiva, sin tener en cuenta el fenómeno de explosión combinatoria. Las uniones se representan mediante el elemento físico que las materializa (tornillos, remaches, bisagras,...) [31].

Kay y Chassapis han revisado los avances en sistemas CAPP. Y han identificado como una necesidad la existencia de una interfaz que integre los sistemas CAD y CAPP. Clasifican los sistemas de planificación de procesos según su enfoque. Los sistemas variantes se apoyan en planes de procesos estándar que se particularizan para cada proyecto. Los sistemas generativos desarrollan planes originales, por lo que su formulación es conceptualmente más compleja. Por ello, los autores consideran que una línea de desarrollo adecuada es la de sistemas semigenerativos, que permitan la modificación de planes estándar empleando el reconocimiento automático de familias y disminuyendo la interacción del usuario mediante conocimiento, como fórmulas y reglas [34].

El sistema que presentan Kampker et al. también posee un carácter integrador, dado que evalúa la flexibilidad según el punto de vista del ciclo de vida para la toma de decisiones en las inversiones implicadas en la creación de sistemas de montaje automáticos [35].

La interfaz colaborativa que plantean Dèmoly et al. se basa en la integración de sistemas relacionados con distintas etapas del ciclo de vida, como PDM, CAx, MPM (Gestión de Procesos de Fabricación) y ERP (Planificación de Recursos de la Empresa). La aplicación no abarca todos esos dominios, sino que se posiciona en una zona común para todos, sirviendo de interfaz. El sistema permite la colaboración entre participantes de distintas disciplinas, concretamente arquitectos del producto, diseñadores, planificadores de procesos e ingenieros de procesos, y se define como una Interfaz PLM que han llamado PEGASUS [30]. La aplicación gestiona un intercambio de información entre 3 aplicaciones distintas: el PDM ACSP, el MPM NOTIXIA y el sistema CAD CATIA V5. El resultado final es una solución óptima al proceso de montaje compuesta por una secuencia de montaje, un plan de operaciones y una estructura BOM actualizada según todo ello, de manera análoga a la estructura As Prepared. Para generar la secuencia se busca la solución exacta, por lo que no se evita la explosión combinatoria [30].

Sin embargo, las aproximaciones al problema descritas, buscan definir el montaje de productos de dimensiones significativamente menores que aeronaves. Para el montaje de productos finales aeronáuticos, entran en juego otros factores que impiden la aplicación directa de los métodos descritos [5]-[7][9][10][15][16][17]. El movimiento de los sub montajes puede no ser factible dadas las características de peso y dimensiones de algunos de ellos y la capacidad de los recursos disponibles [9][10][16]. Y debido a la localización de las instalaciones en distintos puntos geográficos, la división de un montaje en varios sub montajes puede suponer transportes internacionales de componentes con costes asociados significativos [6][7][9][17].

Por tanto no se adoptará ninguna de las aproximaciones comentadas, aunque en la metodología propuesta sí se tienen en cuenta algunos factores destacados por los autores revisados. La secuencia de montaje se definirá empleando las uniones entre componentes como restricciones. Asimismo se tendrán en cuenta las implicaciones del proceso de montaje definido en otras tareas del ciclo de vida como el diseño de la distribución en planta de las instalaciones y la definición de la cadena de suministro; ello representa uno de los objetivos principales de la metodología propuesta.

Los métodos metaheurísticos no se aplicarán a la definición de secuencias de montaje, aunque se ha realizado una revisión bibliográfica en dicho campo por su utilidad para optimizar la cadena de suministro. La revisión de la bibliografía en relación con dichas técnicas se encuentra en el apartado 2.4, mientras que la definición de dichos métodos como parte de los desarrollos que se presentan se detallará en el apartado 6.1.

2.2 Definición de líneas de montaje

La definición de la línea se considera un campo importante, pues supone un aspecto fundamental de las soluciones que la metodología debe encontrar. El modelo habitual de línea de montaje encontrado en la bibliografía consiste en un conjunto de estaciones que son recorridas por el producto. Dentro de cada estación se realiza un número de tareas indivisibles y el paso de una estación a otra del producto se realiza, según la hipótesis de línea síncrona que se sigue habitualmente en la industria aeroespacial [15], con un intervalo denominado tiempo de ciclo [5][6][7][15][21]-[25].

Según el enfoque del diseño de la industrialización seguido, tal y como muestra el flujo de trabajo de la Figura 9, la generación de la línea de montaje es la tarea que se debe completar tras una definición parcial de la secuencia de montaje mediante la estructura As Planned. Para terminar de definir la secuencia, se completará una estructura As Prepared ordenando la ejecución de las uniones, y dicha estructura será la entrada para definir la línea [1].

Battaia et al., tras revisar los trabajos más relevantes en el campo, establecen cuatro problemas diferenciados que componen la definición de la línea de montaje. Los dos primeros son el diseño enfocado a la fabricación del producto y la selección de los procesos necesarios para su montaje. Una vez resueltos, se debe definir conceptualmente la distribución en planta que seguirá la línea entre las opciones existentes: líneas rectas, con puestos múltiples en cada estación, con forma de U, circulares o asimétricas. La última parte se corresponde con el denominado problema del Equilibrado de la Línea de Montaje, y es crucial. Consiste en asignar las tareas básicas a las estaciones, respetando un tiempo de ciclo y las posibles relaciones de precedencia [22].

El equilibrado de la línea es un problema abordado por un gran número de autores y para el que existe una amplia variedad de métodos de resolución optimizando tiempos y costes. El problema básico SALB (o Simple Assembly Line Balancing Problem) consiste en distribuir las operaciones del proceso en un número de estaciones, teniendo en cuenta el tiempo de ciclo, entendido como el máximo tiempo de finalización entre las estaciones [25].

Existen distintas variantes del problema: en el tipo SALB-F, el tiempo de ciclo y el número de estaciones vienen dados por motivos de factibilidad; los tipos -1 y -2 minimizan, respectivamente, uno de los dos factores para un valor establecido del otro y el tipo SALB-E se basa en minimizar ambos para mejorar la eficiencia del proceso [104][105]. Otras variantes del problema tienen en cuenta líneas con forma de U (SULB)[22][109] o modelos mixtos (MMALB), es decir, que una misma línea procese productos de varios modelos [52][107].

Nakade estudia el comportamiento de líneas de montaje manuales con forma de U en modo Persecución o Tiovivo, en el que cada operario acompaña a un producto a lo largo de la línea. La velocidad de trabajo de cada operario será distinta, lo cual puede hacer que el tiempo de ciclo varíe periódicamente, y adopte valores mayores que el determinado de la forma teórica. El trabajo aporta nuevas fórmulas para el cálculo del tiempo de ciclo efectivo y establece varios tipos de comportamiento que dependen del número de operarios y de la variación del tiempo de una tarea ejecutada por un operario concreto [109].

Una práctica seguida por diversos autores consiste en aplicar métodos de optimización meta heurística al problema del equilibrado de la línea, dado que la configuración de la línea de montaje es un concepto relativamente fácil de modelizar para su utilización en un sistema automático. Entre los métodos más empleados se encuentra el Algoritmo Genético (GA), en el que cada solución se representa como un cromosoma, con una secuencia de dígitos, los cuales pueden variar o combinarse para originar soluciones mejores.

Gen et. al. aplican el GA al problema SALB-1, tras estudiar la efectividad del método en problemas similares, como el del viajante o la programación de tareas de un taller. Los autores emplean la teoría de Lógica Borrosa para tener en cuenta la incertidumbre y variabilidad de las magnitudes físicas reales, utilizando parámetros definidos como conjuntos borrosos de tipo triangular. La factibilidad de las soluciones que se generan se preserva penalizando aquellas que excedan el tiempo de ciclo y reparando las que violen las restricciones de precedencia entre actividades. El objetivo es maximizar la eficiencia de la línea, entendida como el cociente entre el tiempo de trabajo efectivo y el tiempo de ciclo multiplicado por el número de estaciones [106].

En el trabajo de Alavidoost et. al. se aborda también el problema del equilibrado de la línea mediante métodos meta heurísticos y empleando números borrosos, para casos de líneas con forma de U y mixtas. Se busca optimizar una función escalar cuyos argumentos, o criterios del método, son el número de estaciones y magnitudes relacionadas con la relación entre el tiempo de trabajo efectivo de cada estación y el tiempo de ciclo, como la eficiencia, el porcentaje de tiempo no productivo y el índice de Suavidad, o suma cuadrática de las diferencias de dichos valores en todas las estaciones [105].

Sotskov et. al. siguen una aproximación interesante para el equilibrado de la línea, dado que, además de la optimización, proponen una estimación de la estabilidad de cada solución encontrada, dado que los tiempos de procesamiento de tareas manuales pueden tener una alta variabilidad debido a las diferencias de experiencia entre los distintos trabajadores. Para cada solución encontrada se calcula una bola de estabilidad, es decir, una frontera alrededor del vector generalizado que define dicha solución. Las variaciones de tiempos que superen dicha frontera repercutirán en que la solución deje de ser la óptima para esas condiciones [104].

Todos los trabajos en los que se aplica la optimización automática al problema del equilibrado de la línea obtienen muy buenos resultados en sus casos de aplicación, aunque habitualmente se simplifica en exceso el cálculo de la duración de las estaciones de la línea, pues únicamente se consideran operaciones secuenciales. En procesos de montaje como los asociados a productos de grandes dimensiones del sector aeronáutico, la inclusión de actividades en paralelo está generalizada [5]-[8][15]-[17], por lo que no se podría aplicar este tipo de procesos de optimización sin tenerlo en cuenta.

En el enfoque de Kurashige et. al. se incluye los tipos de piezas que se deben añadir en las operaciones de montaje, como tornillos, tuercas o pasadores, para una línea mixta con una única máquina o estación. Se busca mantener lo más constante posible la demanda de piezas, mediante la ejecución de algoritmos heurísticos [100].

Para incluir el tiempo en el modelo, los autores destacan diversos enfoques: en el determinista cada tarea tiene una duración fija e invariante, adecuado para líneas automatizadas; en el enfoque estocástico se tiene en cuenta la variabilidad en el tiempo de ejecución de cada tarea y la acumulada en su secuenciación; el enfoque de tiempo dinámico incluye la curva de aprendizaje según la cual cada trabajador reduce asintóticamente el tiempo de procesamiento de cada tarea [25].

Ríos et al. plantean que una línea de montaje viene definida por estaciones, el conjunto de relaciones de precedencia entre estaciones y entre tareas y la asignación de tareas a estaciones. Por ello se diseñarían mediante tres etapas consecutivas, definir la línea, las tareas de montaje y las operaciones elementales. Se considera que el diseño de líneas de montaje en el sector aeronáutico, que implican operaciones entre componentes de grandes dimensiones e instalaciones de sistemas complejos, requiere un enfoque particularizado del problema [15].

Otras características de las líneas aeronáuticas son series de producción más pequeñas, la deslocalización de la línea completa [10][16], un tiempo de ciclo igual para todas las estaciones, es decir líneas de montaje de tipo síncrono, y el hecho de que se diseña la línea de montaje para un único producto con variaciones [15].

Amen propone una solución al problema orientada al coste, de forma que se definan estaciones teniendo en cuenta el coste horario de los recursos asignados, incluyendo el salario de trabajadores según su formación. Las estaciones se definirán buscando que los recursos asignados tengan un coste horario parecido, pues de esa forma se minimiza el llamado coste por inactividad, que depende del tiempo que un recurso esté inactivo [23].

Manavizadeh et al. plantean un modelo de línea de montaje mixta compuesto por un número de estaciones conectadas en las que se realizan sólo operaciones manuales. En el modelo se asume que todos los trabajadores tienen la misma cualificación multidisciplinar y todas las máquinas se pueden emplear en todas las tareas. Se persigue minimizar una función objetivo en la que se otorga distintos pesos a un número de variables entre las que cabe destacar el coste por inactividad. Se emplea el método metaheurístico de Algoritmo Genético para encontrar soluciones con buenos resultados [52].

En el trabajo de Klein et. al. se razona que los procesos de optimización automática o de aplicación de inteligencia artificial no son adecuados para la definición de líneas de montaje automáticas. Los autores argumentan que el plan inicial requiere de la intervención de un grupo multidisciplinar de personas que lleguen a un consenso, y un hipotético cambio por optimización en etapas posteriores requeriría un alto coste de tiempo y esfuerzo. Sin embargo sí se reconoce la aplicabilidad de métodos automatizados de IA para gestionar la recuperación tras errores, el funcionamiento si no se conoce el estado de la línea o cuando se desea que el operario únicamente controle comandos de alto nivel. El objetivo del trabajo es obtener una herramienta que genere diversos planes para el PLC, eficiente y que funcione en tiempo polinómico (que las soluciones se obtengan en un tiempo que aumente según una función polinómica con el tamaño del problema). Se propone un algoritmo que se aplica en dos fases, se desarrolla un plan general incompleto y posteriormente se definen subplanes para satisfacer algunas operaciones indefinidas. Los desarrollos se aplican al caso del montaje de un coche de juguete [103].

Duvivier presenta una herramienta para asistir en la toma de decisiones al definir el flujo de productos dentro de la línea de montaje. Sigue un enfoque diferente asumiendo unas estaciones ya definidas pero que se pueden ordenar de diversas formas. La herramienta busca la solución óptima según varios criterios: número de tareas que se pueden retrasar según cada ordenación, atraso medio, tiempo máximo para completar todas las órdenes, el adelanto medio y el número de veces que sería necesario añadir un recurso en paralelo para mantener el ritmo de producción [53].

Otro enfoque relativo a la asistencia a la toma de decisiones es el planteado por Salmi et. al. Se centra en el nivel de automatización de la línea y la asignación de recursos. El método evalúa el tiempo de ciclo, el tiempo total y el coste según el tipo de operaciones, la tecnología que emplean (manual, automática o robots) y el impacto sobre el tiempo. Si un recurso no es lo bastante rápido para satisfacer el ritmo de producción se sustituye por uno de otro tipo o bien se duplica, mientras que si tiene características que superan con mucho los requisitos, se sustituye por otro más barato. Este trabajo es interesante como referencia para esta tesis porque abarca la asignación de recursos a la línea, considerando su velocidad y coste, y contempla la creación de una base de datos con los posibles tipos de actividades [102].

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

Figura 12: entorno CATIA V5 ejecutado junto a la aplicación DPE para la definición de procesos

Ramezani et al. también incluyen la asignación de recursos a la optimización de la línea de montaje. Los autores buscan asignar operaciones a las estaciones de la línea optimizando una función escalar que depende del tiempo de ciclo y del coste operativo total, teniendo en cuenta las habilidades de los distintos tipos de trabajadores y sus salarios. Se aplica un algoritmo meta heurístico denominado Competitivo Imperialista, en el que cada solución se comporta como un país, que puede ser capital o colonia de un imperio. Las colonias mejoran acorde a las características de su capital y pueden superarla en calidad y sustituirla, mientras que cada imperio busca aumentar su número de colonias [107].

Más et al. proponen un enfoque colaborativo de la definición de la línea de montaje. Se realizaría de forma conjunta con el diseño del producto. Los implicados serían tanto ingenieros de procesos como ingenieros de diseño, y usarían las mismas herramientas PLM. El resultado sería un modelo digital de todos los elementos implicados, incluyendo objetos físicos como productos, recursos o instalaciones e información: requisitos, especificaciones, reglas, pedidos. Este modelo se conoce como maqueta digital industrial o iDMU [6].

La iDMU se ha descrito como una plataforma para realizar y validar el diseño industrial de una línea de montaje [8][90]. Permite llevar a cabo de forma concurrente el diseño funcional del producto y el diseño de su industrialización

En el contexto de la ingeniería colaborativa y la definición de una iDMU, las herramientas DPE y DPM se emplean para facilitar la gestión de la estructura industrial del producto y la estructura del plan de procesos de montaje. La aplicación DPE ofrece una forma rápida de generar y modificar ese tipo de estructuras, cuya correspondencia con la iDMU se actualiza automáticamente al abrir su archivo correspondiente. Un caso de estudio ha revelado la utilidad de herramientas que, como DPE, asistan a la generación de estructuras del producto y proceso para el diseño industrial según el enfoque concurrente [8]. La Figura 12 muestra una ventana con la interfaz de DPE, compuesta de menús, y a su derecha una ventana del entorno DPM donde se muestra el modelo digital 3D (iDMU).

Por tanto se puede concluir que existen diversas formas de plantear la línea de montaje atendiendo al modelo de tiempos, teniendo en cuenta unos tiempos fijos, deterministas; con un enfoque estocástico o bien de tipo dinámico, incorporando unas curvas de aprendizaje. El enfoque basado en el balanceo de la línea para la definición de la línea de montaje está

aceptado por la mayoría de autores. Además dicha tarea se puede llevar a cabo mediante una secuencia de toma de decisiones, y ser optimizada empleando métodos meta heurísticos.

Se concluye, además, que los autores valoran muy positivamente y justifican el empleo de herramientas que asistan en la definición de estructuras de productos y procesos de forma coherente con una modelización digital o iDMU en un entorno tridimensional, en un marco de ingeniería concurrente y colaborativa.

2.3 Definición de la logística y la cadena de suministro

En la metodología que se ha desarrollado la red logística tiene un papel fundamental, dado que se plantea un modelo de producción con diversas plantas para el ensamblado que pueden estar separadas geográficamente. Los montajes de componentes salientes de cada planta representan las entradas de otras plantas, y se consideran productos intermedios del producto final. Puede considerarse que el papel de la red logística es, por tanto, el de comunicar las distintas instalaciones entre sí, trasladando los productos intermedios de unas a otras, cumpliendo unos requisitos de tiempos. En la literatura revisada también se aplica dicha consideración [44][51][55][62][63].

Además de desempeñar un papel importante dentro de la producción, y concretamente en el montaje en líneas deslocalizadas, la red logística tiene un impacto considerable sobre el coste y los tiempos asociados al proyecto de industrialización. En productos de tamaño medio, como electrodomésticos, el coste asociado al transporte de componentes entre plantas de la cadena de producción se ha calificado como muy elevado [44][51][54]. Si se extrapola a un producto de las dimensiones de una aeronave, queda de manifiesto la importancia económica de esta faceta de la producción [55][64]. En cuanto a la repercusión relativa a los tiempos, el transporte de componentes es una tarea precedente de cualquier proceso de montaje, por lo que tiene una influencia directa sobre el tiempo de ciclo para líneas de montaje síncronas.

Según el modelo definido en la metodología que se presenta, la localización de los distintos nodos de la red logística también forma parte del problema. En las primeras fases del diseño de la industrialización, la ubicación de proveedores y centros de producción puede no estar definida, o al menos no completamente [56], por lo que se requiere un proceso en el que se defina dichas ubicaciones, junto con los medios para cubrir el transporte entre ellas.

Por todo lo anterior, las decisiones tomadas en dicho proceso tendrán mucha influencia sobre la producción.

En todos los sectores se debe abordar la problemática de la definición de la red logística, habitualmente como parte de la fase de industrialización del producto. En la literatura, se denomina generalmente cadena de suministro a lo que en la metodología se designa como red o distribución logística. Si bien hay un consenso general respecto a lo que representa la cadena de suministro, cada autor plantea variaciones en cuanto a lo que implica su proceso de diseño. Por ejemplo, se puede incluir o no la localización de los nodos de la red o la definición del transporte. También varía el planteamiento del problema según el alcance de cada enfoque: se puede modelizar toda la cadena, incluyendo a proveedores y clientes o centrarse únicamente en una parte [44][51][54]-[58][62][63].

A continuación se realizará un repaso de los distintos acercamientos al diseño de la cadena de suministro encontrados en la literatura. Se han revisado artículos aplicados a diversos sectores, no únicamente al sector aeroespacial. Cada aportación es interesante no sólo por la forma de abordar el problema sino también por cómo el autor modeliza dicho problema, en cuanto a su forma de representación, restricciones y consideraciones.

La forma de resolución estará muy relacionada con la modelización, pero se observa una tendencia a la optimización automática de la solución. Dado el carácter combinatorio discreto del problema, quedará de manifiesto que se aplican métodos basados en la meta heurística para obtener soluciones de calidad evitando la complicación que supone el alto número de posibilidades.

La propuesta de Calvete et al. plantea un modelo de la red de suministro similar al que se presenta en este trabajo, en el sentido en que comprende tareas que a menudo no son desempeñadas por una misma empresa sino por varias, mediante subcontratas o colaboraciones. El autor argumenta que los desarrollos que propone son aplicables tanto si las tareas son compartidas o se trata de una única gran empresa. Los autores plantean un problema de planificación de la producción y la distribución, que consiste, respectivamente, en repartir el volumen de fabricación entre un número de plantas existentes y definir las rutas de transporte de productos entre ellas, los depósitos o centros de reparto y los clientes. En este caso se trata de productos terminados y que deben ser distribuidos, y cómo ello afecta a la planificación de la producción de unas plantas dadas. Como forma de resolución se propone un proceso de optimización meta heurístico en dos niveles: uno primario para designar qué depósitos sirven a cada cliente y los recorridos, y uno subordinado en el que, según la solución del anterior, se distribuye el volumen de la producción entre las plantas disponibles [44].

También en línea con esta idea, Cheng et al. consideran que la planificación integrada de la producción y la distribución es imprescindible para lograr una optimización global de la cadena de suministro. En este caso la planificación de la producción hace referencia a la programación de procesos, y se aplica a la fabricación por lotes. Los autores proponen la obtención de una solución factible para la programación, entendida como la secuencia de procesos en las distintas máquinas que debe seguir cada producto de los que se fabrican, de forma que se minimicen los tiempos de inactividad. Una vez obtenida dicha solución, se determina una configuración factible de la cadena de distribución. Todo ello se realiza mediante la ejecución del algoritmo meta heurístico de Optimización de Colonia de Hormigas (ACO) [63].

Baud-Lavigne et al. proponen un enfoque integrado del diseño del producto con el diseño de la cadena de suministro, dado el impacto que tiene ésta sobre el coste final y la relación entre ambos, según la línea del diseño enfocado a la logística, DFL. Los autores consideran que el diseño de la cadena de suministro incluye decisiones estratégicas a largo plazo, como la elección de las instalaciones para la producción y sus cargas de trabajo, y decisiones tácticas como la elección de proveedores [51].

En dicho trabajo, se propone definir la cadena de suministro conjuntamente con parte del BOM (Bill Of Materials) del producto. El modelo tiene en cuenta un tiempo de procesado y un volumen físico de cada sub montaje, que repercuten en los costes de transporte y producción. Además, se incluye la posible estandarización del producto, que consiste en incluir productos que posean sub montajes o componentes comunes con otros productos industrializados [51]. El enfoque propuesto en la metodología que se presenta es similar, dado que se genera la estructura As Planned, una reorganización del BOM, y ello impone unas restricciones que definen la estructura de la cadena logística.

Según Prakash et al., la cadena de suministro se puede representar como una red de fábricas y puntos de distribución. Proponen un modelo basado en nodos con los roles de proveedores, fabricantes, almacenes, vendedores y clientes. Dado que se desea reducir tanto el tiempo como el coste de transporte, define una función objetivo que aporta un peso relativo a cada uno. Dichos valores se calculan empleando una serie de matrices de 3 dimensiones (repartidores, destinatarios y productos): una matriz con las demandas, otra con los costes de los transportes según el producto y la distancia y otra con los tiempos. Como forma de resolución proponen un método metaheurístico, similar al algoritmo genético, denominado

Sistema Inmune. El método trabaja a partir de una población inicial de soluciones aleatorias, que son optimizadas hasta alcanzar la calidad requerida. Se utiliza la lógica borrosa para evaluar las soluciones intermedias y determinar el tipo de actuación siguiente [54].

Tang et al. consideran un modelo de cadena de suministro similar para el ensamblaje de productos del sector aeronáutico. En su planteamiento proponen una red de nodos coherentes con un producto de estructura ya establecida. Según el modelo, cada solución factible está basada en la configuración de las opciones disponibles: hay un número de posibles suministradores, sitios candidatos para la fabricación y clientes en localizaciones ya fijadas. Se incluye la colaboración entre participantes transoceánicos como posibles opciones. Se realizan varios experimentos para un caso de estudio en el que el producto es el cajón central de una aeronave. Se modifican parámetros de la producción: variando el coste de la mano de obra y alternando entre fabricar o subcontratar. Otros experimentos interesantes los realizan introduciendo variaciones del perfil de la demanda, comprobando las repercusiones de la evolución del número de unidades demandadas según curvas trapezoidales, triangulares o constantes. Los resultados se cuantifican mediante el Valor Actual Neto (VAN ó NPV) del proyecto [55].

Los trabajos revisados ponen de manifiesto que existe una idea ampliamente aceptada que consiste en considerar que la cadena de suministro debe ser diseñada concurrentemente con el producto, dado su impacto en el coste final [51][53]-[55]. La metodología que se expone en la presente tesis doctoral sigue este enfoque concurrente.

Moncayo-Martínez et al. presentan un modelo para la cadena de distribución que consiste en una red con un conjunto de nodos que puede ser de tres tipos distintos: de reparto, fabricación o entrega según si representan el origen de los componentes de entrada, las plantas dónde se ensamblan o el lugar de destino de los productos de salida, respectivamente. Cada nodo representa una tarea. La estructura de la red viene ya establecida como condición inicial, y debe ser coherente con la BOM del producto. La tarea representada en cada nodo puede desempeñarse según un número de opciones distintas, que componen el conjunto de soluciones. El objetivo es minimizar los costes en equipos y recursos y el tiempo de cola, considerado el tiempo que tarda un producto en ser ensamblado y entregado. Para ello, de nuevo, han optado por un algoritmo metaheurístico de búsqueda de soluciones. Emplean una adaptación del algoritmo ACO. Se busca maximizar una función escalar cuyos argumentos son el coste total en bienes y el tiempo de cola [56].

Kumar et al. no intentan obtener un modelo adecuado de la cadena de suministro, en su lugar plantean una evaluación de su eficiencia teniendo en cuenta nueve parámetros, ordenados según su importancia mediante las respuestas de profesionales de la industria a un cuestionario diseñado por los autores. Los parámetros se clasifican en tres categorías según su influencia sobre la calidad, el coste y el tiempo. Para la evaluación se utiliza la teoría de Lógica Borrosa: cada categoría se evalúa por separado y posteriormente se evalúa la combinación de los tres resultados para obtener una puntuación para el ejemplo de cadena de suministro dado [57].

Ganga et al. también presentan un sistema para evaluar la cadena de suministro según varios criterios empleando la Lógica Borrosa. En este caso se emplea el modelo SCOR del organismo Supply Chain Council. Dicho modelo plantea una jerarquía de propiedades para evaluar unos atributos fundamentales: fiabilidad en cuanto a calidad, cantidad y plazos; capacidad de respuesta; costes; flexibilidad y capacidad de adaptación y eficiencia en la gestión de recursos. El trabajo alcanza el segundo nivel de desglose de los atributos del modelo. El planteamiento se basa en el punto de vista de un nodo de la cadena, con unos suministradores y unos clientes asociados [58].

El planteamiento de Nia et al. muestra la red logística como un conjunto de agentes que interactúan entre sí, cada uno según su política. Los autores proponen una gestión de la cadena de suministro según la idea de Inventarios Gestionados por Vendedores (VMI), en contraposición del enfoque tradicional en el que cada agente gestionaba únicamente su propio inventario y actividades de producción y distribución, y sólo recibía información del nodo siguiente de la red. Según la gestión VMI, cada vendedor es el responsable de todo lo mencionado y de los elementos ubicados aguas abajo en la cadena. El nuevo planteamiento favorece a todos los implicados pues se comparte la responsabilidad de forma más equitativa, pero requiere una ayuda eficaz para la toma de decisiones. Para ello es de mucha utilidad el acceso a información histórica, y cuando ésta no está disponible se requiere una modelización eficaz de la incertidumbre. Es en este supuesto en el que los autores ponen de manifiesto la utilidad de la Lógica Borrosa para la toma de decisiones. Se presenta un método para la toma de decisiones basado en la meta heurística de ACO, con la particularidad de que introducen las ecuaciones básicas obtenidas al aplicar la Lógica Borrosa dentro de las ecuaciones para la estimación del cálculo total asociado a la cadena de suministro, de forma que se obtiene una función, que será el objetivo a optimizar mediante el algoritmo [62].

Los trabajos revisados acerca de la definición de la cadena de suministro comparten, de manera casi mayoritaria, varias ideas básicas que se podrían citar como conclusiones del apartado. En primer lugar, que dicha definición obtendrá mejores resultados si se ejecuta de forma conjunta con la planificación de otros aspectos de la industrialización y concurrentemente con tareas del ciclo de vida que influyen sobre todo ello, como el diseño del producto [44][51][54][55][63].

También se aplica de forma reiterada las soluciones basadas en la aplicación de la Lógica Borrosa [54][57][62], dado que en muchos casos se debe recurrir a optimizar soluciones según varios criterios y a partir de información de la que no se puede obtener resultados concluyentes hasta la obtención de la solución completa.

El otro planteamiento compartido consiste en la aplicación de métodos meta heurísticos para resolver el problema [44][54][56][62][63], dado el carácter matemático de optimización combinatoria del mismo. La metodología planteada en la presente tesis doctoral también sigue este enfoque. En el siguiente apartado de la revisión del estado del arte se comentarán trabajos en los que específicamente se aplican métodos de este tipo a problemas similares, y en el apartado 6.1 se procederá a justificar y detallar esta aproximación.

2.4 Sobre ACO o algoritmos meta heurísticos

Como ya se ha discutido, la definición de la red logística representa una parte importante de la metodología. Esto se debe tanto a que es una componente necesaria de cualquier solución factible al problema general que se plantea en este trabajo como al impacto que tiene sobre el proceso de montaje de un producto en términos de tiempos y costes.

Por tanto, los desarrollos que se recogen en esta tesis se han enfocado, en gran medida, a la búsqueda de un método que permita resolver el sub problema de la definición de la red logística obteniendo soluciones de calidad. Los primeros pasos para alcanzar un método de resolución adecuado fueron modelizar el problema, cuyo resultado fue el modelo descrito en el apartado 5.4. y revisar enfoques de otros autores a este problema y similares tanto en el ámbito de la producción industrial como en otros, revisión que proporcionó ideas acerca de cómo empezar. De esa forma se determinaron las características del problema y se diseñó un modo de resolverlo.

La primera decisión que se tomó fue que esta parte de las soluciones al problema general se determinasen mediante un proceso de optimización automática, aunque el usuario pudiera imponer parte de cada solución. Tras analizar las posibilidades de optimizar el problema, y consultando aproximaciones a problemas matemáticos similares, se determinó que entraba en la categoría de optimización combinatoria, es decir, para el que se puede obtener una solución factible (que cumple las restricciones) mediante una secuencia de decisiones discretas [36]-[38].

Dentro de los problemas de optimización combinatoria, se consideran especialmente complejos aquéllos que se conocen como de tipo NP (Non-deterministic Polinomial time). Para esta clase de problemas, el número de soluciones aumenta con el número de elementos de cada caso concreto a un ritmo superior al polinomial. Ello implica que el tiempo requerido para comprobar de forma automática todas las posibilidades puede hacerse totalmente inasumible únicamente incrementando el tamaño del problema [1]. Un ejemplo clásico de este tipo es el problema del Viajante, en el que se debe encontrar el itinerario más corto que pase por un conjunto de ciudades dado. El número de soluciones al problema del Viajante aumenta de forma factorial con el número de ciudades [36]-[38][40]-[43].

La definición de la red de distribución, tal y como se plantea su modelo en el presente trabajo, es similar al problema del Viajante, por lo que se estudió si se podía concluir que también fuera de tipo NP. Se determinó, finalmente, que es en realidad una generalización de aquél, como se detalla en el apartado 6.1.1.3. Por esta razón, se realizó una revisión de la literatura acerca de formas de optimizar dicho problema, así como otros del mismo tipo en el ámbito de la industrialización del producto.

Entre los métodos para optimizar problemas combinatorios se encuentran los de tipo heurístico, basados en encontrar una solución mediante la toma de una decisión razonada en cada paso y, habitualmente, mejorarla posteriori. Dichos métodos conducen, en el mejor de los casos a la obtención de un óptimo local que no descarta la existencia de una solución significativamente mejor [38][40].

Existe otro tipo de métodos, conocidos como meta heurísticos, que producen resultados más fiables. Consisten, en su mayoría, en la ejecución de un alto número de iteraciones de métodos heurísticos, de forma que cada solución obtenida aporta, según sus resultados, información para ajustar el proceso y mejorar las siguientes soluciones. Por tanto, de manera estadística, se obtienen soluciones cercanas al óptimo [36]-[38][40].

Los métodos meta heurísticos también presentan varias categorías. Los métodos basados en modelos utilizan un sistema probabilístico para generar nuevas soluciones basándose en las existentes pero concentrándose en las regiones con soluciones de mayor calidad; a diferencia de los métodos basados en instancias. Algunos métodos basados en modelos son el Ascenso Estocástico de Gradiente (SGA), algoritmos evolutivos como el genético (GA) [105][106] o el Competitivo Imperialista (ICA) [107] y la Optimización de Colonia de Hormigas (ACO) [38]. Por ser el más aplicado al problema del viajante y a otros de tipo NP relacionados con el diseño de la industrialización, se ha revisado de manera especial los trabajos que incluyen aplicaciones de algoritmos de tipo ACO.

El algoritmo ACO está basado en la conducta de las hormigas en busca de comida. En las decisiones a tomar al definir la ruta, las hormigas se guían por su percepción y por el rastro de feromonas que han dejado las hormigas que han salido previamente. Un rastro mayor significa que un mayor número de hormigas han elegido esa ruta, por lo que probablemente dé un buen resultado [41][42].

El algoritmo genera una primera oleada de hormigas. Cada hormiga define paso a paso una solución tomando decisiones según lo inferido por datos heurísticos. Los caminos que han recorrido las hormigas al definir esta primera población de soluciones quedan marcados por las feromonas. De forma que las hormigas de la siguiente oleada tendrán más probabilidades de pasar por ellos también. Las feromonas se evaporan con el tiempo si no se depositan nuevas. El proceso se repite con nuevas oleadas hasta alcanzar unos resultados aceptables de las soluciones o un número máximo de iteraciones [38][56][59]-[61].

De entre los métodos para la resolución de problemas NP, se ha seleccionado el ACO porque se ha implementado con éxito para la resolución del problema del viajante [42][43][59][60], que es similar a la definición de la cadena de suministro tal y como se plantea. La implementación de este método es asumible para codificarlo mediante lenguajes no específicamente matemáticos y ha dado resultados satisfactorios en problemas de planificación [60]. En el apartado 6.1.2.3 se proporciona una justificación más detallada de la elección. A continuación se expondrá los trabajos encontrados para la resolución de problemas de optimización combinatoria mediante la aplicación de algoritmos de tipo ACO y otros métodos meta heurísticos.

Salari et al. han desarrollado una combinación del algoritmo ACO con la programación dinámica para resolver una variante del problema del Viajante llamada problema del Viajante que Cubre (CSP). El CSP no impone que se tenga que recorrer todos los vértices del problema, puesto que cada nodo recorrido cubre una zona que puede incluir otros nodos. La programación dinámica consiste, de forma simplificada, en realizar ciertos cálculos por adelantado para ahorrar tiempo de ejecución. Además, los autores incluyen métodos heurísticos para la mejora de las soluciones obtenidas al ir ejecutando el algoritmo, sustituyendo vértices o grupos de vértices por opciones mejores detectadas [49].

Manavizadeh et al. proponen el uso de un método meta heurístico denominado Algoritmo Genético (GA) para la secuenciación de las tareas de la línea de montaje. El objetivo es minimizar una serie de valores de la línea relacionados con el coste, entre los que se encuentra el coste asociado al tiempo de inactividad, el asociado a la reconfiguración de cada máquina, a la variación del ritmo de la producción, a los retrasos o a los errores de los operarios. El GA funciona mejorando un conjunto de soluciones factibles dado, mediante operaciones de mutación y cruce, según cómo se valoren los distintos aspectos de cada solución [52].

Prakash et al. han aplicado un método meta heurístico denominado Sistema Inmune (IS), precisamente para la búsqueda de soluciones que optimicen la cadena de suministro. El método IS funciona a partir de una primera generación de soluciones aleatorias, que se van mejorando mediante procesos denominados hiper mutación y proliferación, que se aplican según unos agentes que actúan como anticuerpos que valoran los elementos de esa solución como positivos o negativos. El método es similar a GAL. Se busca minimizar una función del coste y el tiempo, y se aplica la Lógica Borrosa para determinar cada actuación [54].

Moncayo-Martínez et al. proponen una aplicación del ACO para la definición de la cadena de suministro. Establece una red de nodos de suministro, fabricación o reparto, cada uno con un número de opciones para su ejecución. El objetivo es minimizar dos factores, el tiempo de entrega y el coste de bienes vendidos. La probabilidad de la elección de una opción es proporcional a la suma de los inversos de los valores de dichos parámetros, cada uno multiplicado por un factor. La tasa de evaporación de feromonas es la suma de dos exponenciales decrecientes en función de los mismos parámetros divididos por sus correspondientes factores [56].

Wang et al. han desarrollado un método ACO para la planificación del proceso de montaje, e incorporan novedades al algoritmo. Acoplan el problema de definición del espacio de soluciones con el de generar soluciones factibles. Puesto que las hormigas artificiales pueden alcanzar un punto que no permita finalizar la creación de la solución. Para esos casos se incorpora la posibilidad de “muerte de la hormiga”. Ello se ha implementado de forma que se modifica una propiedad de factibilidad del nodo correspondiente para descartarlo en futuras oleadas de hormigas. Se emplea el coste como función a minimizar en el algoritmo [61].

Nia et al. presentan la utilización de un algoritmo ACO para optimizar soluciones a su enfoque del problema de la definición de la cadena de suministro, basada en el sistema de Inventarios Gestionados por Vendedores. Introducen la Lógica Borrosa para la toma de decisiones durante la ejecución, y para evaluar en términos de costes las soluciones obtenidas. Para ello sustituyen las ecuaciones de los procesos de borrosificación y desborrosificación en la ecuación para el cálculo del coste [62].

Wang et al. plantean en su trabajo un algoritmo de tipo ACO para la realización integrada de la planificación de procesos y su programación. Para ello modelizan el problema mediante un diagrama de grafos “AND” y “OR” al que imponen las relaciones de precedencia de cada caso concreto [50].

Un ejemplo de aplicación del método ACO en problemas fuera del ámbito de la industrialización del producto es el que proponen Gebreslassie et al. Los autores emplean el algoritmo para el diseño de procesos químicos. Concretamente se utiliza para la determinación de los solventes óptimos en varias reacciones usadas en la industria química [65].

Liao et al. proponen un algoritmo ACO para optimizar la programación de procesos en un sistema de producción de dos etapas. La solución se genera en dos pasos, primero se minimiza el total de tiempos de reconfiguración de las máquinas, posteriormente se minimiza el número de reconfiguraciones en cada etapa. Los autores presentan los resultados de probar el algoritmo con distintas configuraciones de parámetros y los ajustes realizados para prevenir fenómenos de convergencia prematura [47].

En la línea del ejemplo anterior, Tavares et al. muestran la aplicación de un algoritmo ACO, también en dos etapas. Sin embargo, en este caso el código secundario no se ejecuta a continuación del principal, sino dentro del mismo, en cada repetición del bucle para generar soluciones. Añaden el proceso de búsqueda local tras generar cada solución para mejorarla. Utilizan una variante del algoritmo denominada Sistema de Colonia de Hormigas (ACS) [66].

Kesen et al. demuestran la efectividad del empleo del método ACO para la programación de procesos en células virtuales, es decir, que incluyen máquinas separadas físicamente. Los autores realizan las pruebas con un ejemplo del problema con un alto número de máquinas y componentes [67].

Calvete et al. también emplean un algoritmo de tipo ACO con dos niveles. En este caso se aplica al enfoque integrado de la producción y la distribución. En el nivel principal se determina la configuración óptima del conjunto de almacenes de la red de distribución. El nivel subordinado parte de la solución salida del principal para hallar el reparto óptimo de la producción entre las distintas plantas de forma que se satisfaga los requerimientos de los almacenes intermedios y de los clientes [44].

Saenphon et al. combinan el algoritmo ACO con la búsqueda rápida del gradiente opuesto (FOG) para resolver el Problema del Viajante. El método que han definido consiste en ejecutar el algoritmo FOG para crear la primera solución factible del problema. Por las características de dicho algoritmo, la solución se encontrará cerca de un óptimo local, y a partir de ahí se ejecuta el algoritmo ACO [46].

En otro ejemplo de aplicación a procesos de fabricación de dos etapas, Guo et al. usan una modificación del método ACO que incluye una descomposición del problema para resolver la programación de procesos. Los autores cuantifican las ventajas del método, y argumentan que ayuda a conseguir soluciones de calidad gracias a que distribuye información obtenida a través del aprendizaje por todo el modelo. Asimismo destacan que permite la fácil incorporación de restricciones y reglas al sistema. Plantean el inconveniente de que el método estándar no funciona bien para el caso de máquinas híbridas. Para resolverlo incluyen la descomposición previa en subproblemas, que el algoritmo ACO resuelve y cuyas soluciones son posteriormente integradas [68].

Leung et al. han desarrollado un sistema multi agente que funciona siguiendo un algoritmo ACO para la optimización de la programación y la planificación de procesos integradas. Cada hormiga artificial es, en este caso, un agente software que actúa separadamente y de forma simultánea con otros. Los autores emplean un diagrama de grafos “AND” y “OR” para representar el problema y sus restricciones [69].

Cheng et al. aplican el método a la planificación integrada de la producción y la distribución. De nuevo se ejecuta en 2 fases. En la primera se realiza la programación de procesos por lotes en las máquinas. Posteriormente se define el proceso de reparto, de forma compatible con lo definido en el paso anterior [63].

C.-Y. Cheng et al. presentan un enfoque híbrido en el que se combina el algoritmo ACO con el método meta heurístico de Optimización de Nube de Partículas (PSO). Los autores buscan optimizar el proceso de recogida de componentes de los almacenes. Su planteamiento se basa en una optimización conjunta de la separación de los ítems a recoger en lotes y de su ordenación para su recogida. El primer aspecto se define mediante un algoritmo PSO, mientras que el segundo se resuelve en un nivel subordinado empleando un algoritmo ACO. La ejecución de éste último se incluye en cada iteración del primero [70]. Eso funciona en el trabajo presentado por los autores, pero puede suponer un alto requerimiento de tiempo de computación en otros casos. En la metodología que se propone se han probado implementaciones similares y se han descartado debido a su lentitud.

De todos los ejemplos expuestos se puede concluir que los métodos basados en el algoritmo ACO se pueden aplicar a una gran variedad de problemas de optimización combinatoria, relacionados o no con la industrialización del producto. Se destaca, además, que se trata de un método susceptible de ser modificado o combinado para satisfacer las necesidades que requiera cada caso de aplicación, por lo que se puede considerar flexible en cuanto a su implementación.

2.5 Evaluaciones multicriterio

La metodología se propone como una herramienta para el diseño inicial de la industrialización del producto, principalmente enfocada a los aspectos relacionados con la definición, en sus primeras etapas, de una línea de montaje deslocalizada, es decir, con instalaciones en distintos lugares geográficos. Se puede considerar, por tanto, que un objetivo fundamental del trabajo que se presenta es la búsqueda de soluciones concretas para conceptos relacionados con distintos ámbitos del diseño de industrialización, como por ejemplo la definición y el equilibrado de líneas de montaje, la asignación de recursos y la organización de la cadena de suministro.

La solución generada para cada una de estas vertientes del problema tendrá repercusiones para el resto, en forma de variación de sus condiciones iniciales o de las restricciones [61][63][69]. Por ello, se puede hablar de sub problemas acoplados. Además, cada una de las partes implicadas tiene un peso sobre los resultados de la solución conjunta, y hasta conocerla no se puede valorar de forma precisa la eficacia de cada solución parcial, lo que supone un inconveniente. También se considera fundamental, dado que lo que se busca son soluciones al problema completo, una evaluación de todas las que se obtengan como resultado de aplicar la metodología.

Por tanto, una de las cuestiones más importantes que se plantearon al diseñar la metodología es la siguiente. “¿Cómo valorar las implicaciones de cada parte en el resto de las que componen una solución completa?”. Y de forma similar, aunque son conceptos distintos, la siguiente. “¿Cómo valorar la calidad de cada solución parcial?”. También se planteó la siguiente. “¿Cómo medir la calidad de una solución completa?”.

Como respuesta a la primera pregunta, las implicaciones de cada una de las partes vienen determinadas por los conceptos que comparten y la forma en que estos se valoran. Por ejemplo, el tiempo de ciclo es un parámetro compartido por la línea de montaje y la red logística, pues su valor será el máximo de entre los de todas las estaciones de las líneas de montaje existentes y los tiempo de entrega de los transportes, y debe ser menor que cierto valor objetivo. El espacio requerido para una línea es un parámetro que se obtiene de diseñar la distribución en planta, pero además limita la definición de la red logística, pues será un requisito que deberán satisfacer las instalaciones físicas que se seleccionen.

La misma respuesta puede ser aplicable a la segunda pregunta para algunas de las vertientes del problema. Si se conoce qué parámetros de cada vertiente afecta al resto, el valor de dichos parámetros puede ser un indicador de su eficacia para un usuario o un sistema experto. Según eso, para los ejemplos anteriores, una línea de montaje sería considerada buena si su tiempo de ciclo no superase el tiempo de ciclo total, y en principio será mejor cuanto menor espacio en planta requiera [15]-[17].

Sin embargo, para otras vertientes no basta con conocer el valor de los parámetros compartidos. Para la definición de la cadena logística, se utiliza un método meta heurístico, por lo que se requiere la valoración de un conjunto de soluciones factibles de esa parte para el proceso de generación una solución de la mayor calidad posible [38][40]. Tampoco será suficiente si lo que se pretende es una evaluación de la solución completa, o determinar la mejor opción entre dos posibilidades. En ambos casos, se hace imprescindible una evaluación multicriterio, es decir, un sistema que genere una puntuación en base a varias entradas [53][54].

Por todo lo anterior, se considera que el concepto de evaluación multicriterio está muy relacionado con la metodología. La idea de obtener una valoración conjunta de varios valores representativos de criterios distintos puede parecer simple, o de fácil resolución mediante una sencilla función escalar con un dominio multi dimensional. Sin embargo, la complejidad viene dada precisamente por la forma de determinar dicha función o, dicho de otro modo, de determinar qué peso relativo se le debe asignar a cada parámetro.

Según la Teoría de la Eficiencia de Pareto, una solución valorable según varios criterios se considera un óptimo de Pareto si no se puede mejorar sus resultados según ninguno de los criterios sin que empeoren algún otro. Esto conduce al denominado frente de Pareto, el contorno generalizado que determinan todas las soluciones Pareto-óptimas del sistema.

Este principio permite la diferenciación entre las soluciones consideradas Pareto-óptimas y las que no, pero no resuelve la diferenciación entre soluciones que pertenezcan al frente de Pareto. La Figura 13 muestra el posicionamiento de un conjunto de soluciones según sus resultados en cuanto a dos criterios: tiempo y coste. Las soluciones pertenecientes al frente de Pareto se muestran en verde, y unidas por dicho contorno. Si para cualquiera de ellas se intenta mejorar uno de los criterios, pasando a otra solución, se observa que se empeora según el otro criterio.

De todo lo anterior, se puede deducir que entre cierto número de posibles soluciones con distintas configuraciones de sus valores, la determinación de cuál es la más adecuada no es algo trivial [53][73]. Por ejemplo, si una alternativa supone respecto a otra un ahorro de tiempo de un 30% pero un coste un 20% mayor, según el principio de Pareto no se podría determinar a priori cuál es más favorable.

La evaluación según varios criterios es un problema que aparece de forma recurrente en el diseño de industrialización, la planificación de procesos, la distribución de la producción y la definición de la cadena logística. Distintos autores han desarrollado distintos enfoques y metodologías para abordarlo.

Para la programación de procesos, Duvivier et al. presentan un sistema multi criterio en el que se tienen en cuenta las preferencias del usuario. De esa forma se permite la elección de una alternativa que no sea la óptima según ningún criterio. Los autores estiman que los sistemas multi criterio requieren medios para adquirir, sintetizar, simular y optimizar un número elevado de soluciones; y compararlas según puntos de vista de distintos participantes. También especifican que, en sistemas que requieran la participación humana, la información que se presente a los tomadores de decisiones debe ser breve, completa, coherente y precisa, y debe dar una idea de la eficacia, rendimiento e incertidumbre de cada alternativa. En este caso se emplean como parámetros el número de tareas atrasadas, el atraso y el adelanto medios, el tiempo máximo de ejecución de todas las órdenes y el número de veces que se deben reconfigurar los recursos [53].

Figura 13: representación del frente de Pareto para 8 soluciones según 2 criterios: costes y tiempo.

Figura 14: funciones de pertenencia de tipo sigmoide [79].

Figura 15: Funciones de pertenencia de tipo triangular y trapezoidal [77].

Ciszak plantea un método multicriterio más formal matemáticamente, para evaluar posibles secuencias de montaje de un producto. El autor generaliza los distintos criterios a emplear, al aplicar el método de Puntuación de Yager. Según este enfoque, se define una matriz cuadrada con valores de importancia relativa dos a dos entre los distintos criterios. Los pesos de los indicadores de los criterios para la función escalar de evaluación se podrán obtener como los componentes del autovector asociado al mayor autovalor de la matriz [98].

En relación con las evaluaciones multi criterio, se ha estudiado la Teoría de la Lógica Borrosa, dada su aplicabilidad a dicho campo [71][72][73], las ventajas que se asocian a su uso [71]-[82] y el amplio número de ejemplos de su utilización hallados en la literatura.

La Teoría de la Lógica Borrosa (Fuzzy Logic o FL) fue formulada por Lukasiewicz en los años 30s, y desarrollada para su aplicación a problemas matemáticos y de ingeniería en la década de los 70 [57][71][72][73]. Se puede entender como una generalización de la lógica Booleana tradicional, en la que un elemento puede pertenecer a un conjunto según dos únicos estados: o pertenece o no. Según la FL, el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto es un número real entre 0 y 1. En las aplicaciones de FL, cada conjunto borroso tiene una función de pertenencia, que asocia a cada posible valor del dominio su grado de pertenencia correspondiente. El perfil de dichas funciones forma parte del modelado de un sistema basado en la FL [73][76].

Como ventajas del uso de la FL, se ha escrito que es un sistema adecuado para modelizar conceptos imprecisos, ambiguos o asociados a un nivel alto de incertidumbre [73]; que es fácilmente implementable y aplicable para desarrollar modelos, y aún así obtiene resultados equiparables e incluso mejores que otros métodos menos intuitivos [76], y que permite parametrizar un conocimiento no formal, expresable mediante términos lingüísticos, y a partir de ello definir unas reglas que gobiernen un sistema [71][72][73].

La FL es únicamente un modo de razonar, la aplicación del mismo en problemas matemáticos, por ejemplo para evaluaciones multi criterio, se denomina Algoritmo Borroso [57]. Su estructura incluye un proceso de borrosificación, en el que para cada valor de entrada se calcula su pertenencia a los distintos conjuntos borrosos del modelo; un motor de inferencia, en el que se aplican las reglas que componen la base del conocimiento del sistema, normalmente expresadas mediante esquemas del tipo “Si x pertenece a A , e y pertenece a B , ENTONCES z pertenece a C ”; y por último, un proceso de desborrosificación, en el que de la pertenencia de la variable de salida a los distintos conjuntos borrosos se extrae una salida del tipo esperado.

Existe un número de variaciones posibles del Algoritmo Borroso. Cada autor emplea una u otra según las características de cada caso de implementación. Un aspecto que diferencia muchos de los casos de aplicación son las funciones de pertenencia de los conjuntos borrosos, tanto de entrada como de salida. Típicamente, se emplean funciones con forma triangular y simétricas. También es habitual el uso de funciones de forma trapezoidal (Figura 15), o bien que los conjuntos de los extremos del dominio de un parámetro terminen en un valor constante. Otros

perfiles son de tipo sigmoide (Figura 14), y también de tipo gaussiano. Las figuras Figura 14 y Figura 15 pertenecen a las aplicaciones de la FL de dos autores distintos [77][79].

Cada aplicación también puede clasificarse según el tipo de salidas que genere el motor de inferencia. Sobre ello existen dos corrientes fundamentales. El enfoque Mamdani dicta que las reglas del motor de inferencia asocian como resultados la pertenencia a conjuntos borrosos, como por ejemplo “ z es C ”. El enfoque Takagi-Sukeno asocia a cada regla activada un comportamiento, del tipo “ $z = f(x)$ ”.

El proceso de desborrosificación también admite variantes. La pertenencia a los conjuntos de salida (según el enfoque Mamdani), dependiendo de la variante determina un perfil que encierra un área. De esa área se debe obtener un valor representativo, y para ello se puede emplear la posición del centro de gravedad (método CoG), el centro del conjunto de máxima pertenencia (método CoM), o el valor medio (método MoM).

Para entender las propuestas basadas en la FL halladas en la literatura, era necesaria una explicación de los conceptos básicos en que se apoya y algunas de las variantes en su aplicación. Una vez explicados, se va a realizar un repaso de los distintos enfoques basados en la FL hallados en la literatura. La Teoría FL, así como su aplicación en el trabajo que se presenta, se discuten con mayor detalle en el capítulo 6.2.

La evaluación que proponen Ganga et al. para la cadena logística tiene en cuenta diversos criterios presentes en el modelo propuesto por el Consejo de la Cadena Logística y se basa en la Lógica Borrosa. Además se plantea un método para desarrollar sistemas que se apoyen en Lógica Borrosa por pasos. Los autores concluyen que esta técnica es adecuada para valorar la eficiencia de la cadena logística. Se emplea funciones de pertenencia triangulares, junto con el enfoque de Mamdani y desborrosificación CoG [58].

En el enfoque que plantean Kumar et al., se emplea también un método multicriterio, para valorar a los proveedores de la red logística. En este caso se tienen en cuenta nueve variables distintas que se clasifican según el efecto más importante que tienen sobre la producción en tres grupos: variables con efecto sobre la calidad, sobre el coste y sobre el tiempo. Se evalúa por separado cada grupo y finalmente se realiza una valoración conjunta de dichos resultados. Se definen tres conjuntos borrosos para los valores de cada variable. El enfoque es novedoso porque en lugar de implementar veintisiete reglas para cada grupo (tres posibles valores elevado a tres variables), los autores presentan un algoritmo iterativo que elimina las reglas que no contribuyen a la valoración. El algoritmo borroso que implementan tiene asociadas funciones de pertenencia trapezoidales redondeadas y el enfoque de Mamdani [57].

Manavizadeh et al., han desarrollado un modelo mixto multicriterio para la optimización de costes en la definición de la línea de montaje. El modelo se basa en un sistema de tipo distribución basada en pedidos, y en una línea de montaje manual. Los autores utilizan el método de Algoritmo Genético, combinado con la FL para determinar la mejor línea de actuación tras cada iteración [52].

Nia et al. proponen una combinación del método ACO con la FL, para definir la cadena de suministro. Es un caso fuera de lo común, puesto que se basa en sustituir las ecuaciones del proceso de desborrosificación en las ecuaciones para el cálculo de los costes [62]. Esta aportación está en línea con otro modo de emplear la FL, que consiste en utilizar los denominados números borrosos en lugar de números reales. Cada número borroso está definido por los parámetros de su propia función de pertenencia (por ejemplo extremos y centro, si es triangular). Además se han fijado las reglas que definen las operaciones básicas con números borrosos [62].

Siguiendo la línea del uso de números borrosos, también se pueden citar los trabajos de Gen et. al. y Alavidoost et. al. Como se comentó en el apartado 2.2, estos autores realizan evaluaciones multicriterio de las soluciones encontradas para la configuración de la línea de montaje, empleando parámetros relacionados con el tiempo de trabajo real y el tiempo de ciclo, representados por números borrosos de tipo triangular. Las operaciones matemáticas con números borrosos, se redefinen teniendo en cuenta los parámetros que definen cada tipo de número, en este caso los extremos y el centro (a_1 , a_3 y a_2). Para operadores lógicos de comparación (mayor o menor), lo usual es emplear el valor dado por los criterios F_1 , F_2 o F_3 , definidos en las Ecuaciones Ec. 2.5.1 a Ec. 2.5.3, usando el segundo si el primero no es concluyente, luego el tercero y finalmente considerar ambos valores iguales [105][106].

$$F_1 = \frac{a_1 + 2 \cdot a_2 + a_3}{4} \quad \text{Ec. 2.5.1}$$

$$F_2 = a_2 \quad \text{Ec. 2.5.2}$$

$$F_3 = a_3 - a_1 \quad \text{Ec. 2.5.3}$$

García-Díaz et al. han llevado a cabo un estudio comparativo de varios modelos para la estimación del esfuerzo requerido en el desarrollo de Software (requerimientos, codificación, testeo y mantenimiento). Se compara dos modelos basado en la FL y la técnica de Regresión Lineal. Se usa como variable de entrada un indicador del tamaño de cada proyecto, el número de líneas de código; la variable de salida es la estimación del esfuerzo en horas de trabajo.

Los dos modelos basados en FL que se comparan siguen los dos posibles enfoques para el motor de inferencia: Mamdani y Takagi-Sukeno (TS). Para el enfoque TS se emplean funciones de tipo constante. Para estudiar la precisión de cada modelo, comparan estimaciones de distintos proyectos con información histórica de los mismos, y calculan la magnitud del error relativo a la estimación. Según los resultados, el modelo más preciso era el basado en FL según el enfoque Mamdani. La propuesta es interesante porque compara la actuación de dos variantes distintas de aplicación de la FL [74].

Olugu et al. presentan un sistema experto basado en la FL para optimizar los parámetros que intervienen en las líneas de montaje de la industria de la automoción. Se utiliza el concepto de cadena de suministro de bucle cerrado para expresar que se aspira a que tenga un carácter sostenible. Este concepto defiende una cadena de suministro con el conjunto de tareas habitual (compras, fabricación, gestión de materiales y marketing) que se realizan de forma ecológica. Se incluye la reutilización, la reparación y el reciclaje. En el sistema basado en FL, se emplean 3 conjuntos borrosos, tanto para la entrada como para la salida [75].

La aportación de Azadegan et al. es muy interesante. Los autores han revisado un elevado número de publicaciones sobre implementaciones de sistemas basados en la FL en el campo de la fabricación. Como producto del amplio estudio, han concluido varias propiedades ventajosas de la utilización de la FL. Principalmente plantean su facilidad de uso, para desarrollarlo, implementar el conocimiento dentro del sistema y modificarlo en caso necesario. Los autores han examinado más de un centenar de trabajos publicados y consideran probada la aptitud del método para problemas relacionados con la fabricación. Han encontrado diversos ejemplos para el control y optimización de procesos, las células de fabricación, la programación y planificación integradas de procesos, la flexibilización del sistema, control de la calidad, mantenimiento, predicción de la demanda, estrategias de fabricación y la gestión de la cadena de suministro. Por último, plantean la aplicación de un método basado en FL para el reparto de la producción (qué cantidad de cada producto es óptimo producir) y utilizan números borrosos para aplicar técnicas de programación lineal [76].

Abd et al. han aportado un enfoque basado en la FL para la programación de tareas en el ensamblaje mediante robots en células automatizadas. En este caso se requiere un sistema complejo, dado que es preciso una planificación que evite cualquier posible colisión. Los autores proponen la priorización de las tareas de montaje de las células mediante un sistema de evaluación basado en la FL, y lo comparan con otras reglas usadas en este tipo de problemas, como los criterios del tiempo más corto, el tiempo más largo, fecha de fin más temprana o mínimo tiempo inactivo. Los resultados de los estudios indican que el uso de la FL en esos casos obtiene un menor tiempo de ciclo completo y menor retraso. Los autores han desarrollado un algoritmo borroso con cuatro variables de entrada, tiempo de procesado, tamaño del lote, fecha de fin máxima y número de estaciones; y la salida es la prioridad de cada tarea. El motor de inferencia lo componen la totalidad de las reglas esperadas, cincuenta y cuatro en este caso (producto de los números de conjuntos borrosos definidos para las entradas, 3·3·3·2, respectivamente) [77].

Una aportación interesante del trabajo de Abd et al. es la formulación de unos pasos para definir la base de conocimiento sobre la que se apoya un sistema basado en la FL. Según los autores, el primer paso es definir un conjunto de variables lingüísticas que puedan clasificar el denominado universo de discurso (es decir, el dominio de los conjuntos borrosos) de cada variable implicada; por ejemplo, si el parámetro es la edad se podrían definir como variables lingüísticas “Muy joven”, “Joven”, “Maduro”, y “Anciano”. El segundo paso consistiría en diseñar las funciones de pertenencia de cada conjunto borroso de todos los parámetros, en cuanto a forma y valores que las definen. Finalmente, se deben definir las reglas borrosas, que generalmente serán sentencias de estructura “SI antecedente ENTONCES consecuente” [77].

Mariajayaprakash et al. proponen una mejora del análisis de modo de fallo y efectos (FMEA) mediante la aplicación de la FL. El objetivo es determinar los parámetros de fallo que son críticos en los hornos de vapor que funcionan por cogeneración en la industria azucarera de la India. El análisis FMEA estándar implica la calificación de cada tipo de fallo detectado (defecto + parámetro del sistema que lo causó) según tres índices: Ocurrencia, o probabilidad de aparición; Severidad y Detección, o probabilidad de percibirse al producirse. Cada índice se pondera entre 0 y 10, y el producto de los tres valores es el denominado Número de Prioridad de Riesgo (Risk Priority Number - RPN), que determina qué fallos se deben prevenir con mayor prioridad. Según los autores, este sistema presenta la debilidad de que el producto de los 3 índices puede suponer valores del RPN muy distintos para tipos de fallos que cualitativamente tienen una importancia similar. En la mejora propuesta, el valor de cada índice es una entrada al sistema basado en FL, y la salida es el valor del RPN [78].

Para definir los conjuntos borrosos de cada índice, han comenzado por su descripción lingüística, por ejemplo “*Ocurrencia = R significa que es muy poco probable que estos fallos se produzcan incluso una vez*”. El motor de inferencia está formado por 24 de las 125 reglas posibles, dado que muchas no tenían un sentido real. Los autores aplican el análisis FMEA mejorado, junto con el original para comparar, y detectan los parámetros más críticos en el sistema; luego se realizaron experimentos según el método de Taguchi para obtener unos valores adecuados de los parámetros críticos, y finalmente se optimizaron mediante la aplicación del Algoritmo Genético. La comparación entre el análisis FMEA convencional y el mejorado con FL muestra que se identifican los mismos parámetros críticos, y los autores estiman que es más intuitivo definir el RPN mediante la FL pues permite incluir de forma intuitiva el conocimiento no formal [78].

También se han revisado aplicaciones de la FL a campos no relacionados con la fabricación, dado que se buscaba modos de implementación para evaluaciones, independientemente del campo de estudio.

Por ejemplo, Korol et al. proponen el uso de la FL para predecir los cambios en las tasas de cambio entre divisas. Han definido un sistema borroso con siete entradas, mediante las que se determinan dos coeficientes: interés y comercio, que son a su vez entradas para obtener la tasa predecible entre francos suizos, yenes japoneses y libras esterlinas con el dólar de EEUU.

Los resultados muestran que el sistema obtiene resultados de precisión adecuada según los datos históricos de los años 2005 a 2011 (excluyendo 2008 por la crisis, que implicó fenómenos psicológicos y especulativos no incluidos en el modelo). Los autores califican el uso de FL como muy adecuada para este tipo de predicciones porque su diseño interno, principalmente las reglas del motor de inferencia, es fácilmente interpretable y modificable para realizar ajustes que incrementen la precisión de los resultados, al contrario que con otros métodos que se califican como de caja negra[79].

Gagliardi et al. aplican la teoría de la FL para definir un sistema de evaluación multi criterio de la sostenibilidad de una ciudad. Se emplea el sistema para determinar los pesos de dieciocho indicadores, como el nivel de polución, las emisiones de NOx, el uso de transporte público o el consumo energético. Las entradas son las opiniones de 5 jueces expertos, que califican cada indicador [80].

Ozkul et al. presentan un sistema para determinar el estado de degradación de estructuras de hormigón armado. Se plantean como entradas parámetros de los ensayos efectuados y mediciones realizadas en las probetas: el período de las vibraciones a que se someten y la reducción de la fuerza, respectivamente. La propuesta es interesante, dado que utiliza el enfoque T-S, en lugar del Mamdani, más habitual. En este caso, las salidas son nueve posibles funciones lineales de los parámetros de entrada del sistema para determinar el ratio de desplazamiento inelástico (una medida de la degradación) que sufre la probeta. El valor final será una combinación lineal de las funciones de salida según el grado de activación que tenga asociado cada una [81].

Como último trabajo revisado de la aplicación de la FL en campos distintos de la fabricación, se presenta la propuesta de Wulan et al. de un sistema basado en FL para evaluar el riesgo de las colaboraciones entre empresas, enfocado principalmente a las de tipo virtual. Los autores proponen quince factores de riesgo que se borrosifican empleando nueve conjuntos de forma trapezoidal. Los desarrollos también incluyen operaciones con números borrosos. Finalmente, se detalla una aplicación web desarrollada a partir del modelo propuesto, y que realiza la evaluación a partir de unos valores de entrada que introduce el usuario del servicio [82].

En la metodología que se propone, se requieren métodos de evaluación en dos puntos diferenciados. Como resultado de la aplicación del método completo, las soluciones generadas se deben valorar atendiendo a varios criterios. Por otro lado, el algoritmo meta heurístico para obtener soluciones al problema de la definición de la cadena logística, deberá valorar de forma automática en cada iteración las soluciones parciales encontradas y las globales generadas para determinar una forma adecuada de mejorarlas.

Prakash et al. han desarrollado un sistema que incluye valoraciones multicriterio de las dos clases mencionadas. Proponen un método para obtener la localización óptima de los clientes, es decir, la localización de los nodos de la cadena de suministro mediante el meta heurístico Sistema Inmune Artificial, similar al Algoritmo Genético. Su ejecución busca minimizar una función escalar que depende de dos variables, el tiempo de transporte y el coste de transporte, cada una con un peso relativo. Esa es una forma de valoración de soluciones multicriterio. Además los autores proponen un controlador basado en la lógica borrosa para determinar en cada iteración la respuesta del sistema a las soluciones halladas para mejorarlas a posteriori. Para ello, se utiliza como entradas al sistema basado en FL el valor de la función en las iteraciones t y $t-1$, y se aplica el enfoque Mamdani [54].

Como conclusión, se puede argumentar que el empleo de la FL, principalmente mediante la definición de un algoritmo borroso, presenta diversas ventajas para su aplicación como sistema de evaluación multicriterio. Se ha escrito acerca de su facilidad para desarrollarlo, implementar el conocimiento dentro del sistema y modificarlo en caso necesario.

Además, se considera probada la aptitud del método en problemas de valoración de varios criterios relacionados con la fabricación, en campos como el control y optimización de procesos, la programación y planificación integradas de procesos, estrategias de fabricación y la gestión de la cadena de suministro; así como en ámbitos no relacionados con la Ingeniería de Fabricación.

2.6 Estimación de costes

El modelo necesario para soportar la metodología comprende una sección relacionada con los costes imputables al proceso de montaje, dado que se plantea una evaluación de posibles soluciones según, entre otros factores, los costes que implicarían. Por ello, se ha realizado una revisión de la bibliografía: por un lado llevando a cabo una tarea de documentación acerca de formas de estimar los costes en una organización y modelizarlos. Además se han revisado formas de abordar una optimización de otros aspectos de la fabricación atendiendo al coste.

Principalmente, existen dos enfoques para la estimación de costes para cualquier empresa que provea productos o servicios: el enfoque tradicional, que está basado en el volumen de producción y el enfoque basado en actividades (ABC) [83]-[85]. Si bien algunas empresas emplean una contabilidad basada en ambos modelos en conjunto [83].

El objetivo principal es conseguir una buena trazabilidad, es decir, un mayor porcentaje de costes directos o atribuibles a unas tareas específicas frente a los indirectos, que son transversales para los distintos proyectos de la empresa [83]-[85].

El enfoque tradicional se basa en modelos que tienen en cuenta unos costes variables, proporcionales al volumen de producción, y unos costes fijos, que incluyen partidas como las relacionadas con impuestos, depreciación de la planta o plantas o el salario de los ejecutivos. Persigue imputar el mayor número de gastos posible a las unidades de productos o servicios salientes, asignándolos a centros de costes que a su vez tienen asignada una cuota de la producción [83][85].

El enfoque basado en el volumen es inexacto si se incluyen ciertas características, series más pequeñas, mayor variedad de productos y modificaciones en productos destinados a distintos sectores, adoptadas por la gran mayoría de empresas para mantenerse en un mercado altamente competitivo [83]-[85]. Ello se debe a que dichas características implican gastos que no son proporcionales al volumen de producción, por lo que esa parte del coste tiene difícil trazabilidad según este modelo [83]. Producir diversos productos en series más pequeñas conlleva más gastos en instalación de equipos, rediseños o programación de la distribución aunque se produzca un número menor de unidades[85].

El enfoque ABC, por su planteamiento, reduce la inexactitud descrita y mejora la trazabilidad con un mayor porcentaje de costes directos [83][84]. Se basa en la premisa de que los productos o servicios salientes son el resultado de unas actividades que a su vez requieren de la utilización de unos recursos, lo cual incurre en un coste [84]. De esta forma se tienen en cuenta actividades sin una relación directa con la producción como las descritas anteriormente u otras tradicionalmente asociadas a costes indirectos como las pertenecientes a capas más altas de la empresa: actividades organizativas y procesos de negocio [85].

El esquema básico para implementar un sistema de coste basado en actividades es confeccionar dos listas: una con los elementos con repercusión en los gastos generales, como salarios, comisiones o seguros, y otra con las actividades necesarias para la operación de la empresa. Ambas listas se deben relacionar definiendo “medidores de costes de actividad”, y las actividades se relacionarán con un consumo de recursos y un coste definiendo “medidores de costes de recurso” [83][84].

El primer paso consiste en elaborar un diccionario de actividades, divididas atendiendo a su impacto sobre la producción. Las actividades de nivel unidad se ejecutan sobre cada unidad producida; las de nivel lote se ejecutan para cada serie producida; otro tipo de actividades impactan sobre la producción de una familia de productos, como rediseños o cambios en la ingeniería; y las actividades de mayor nivel soportan la operación completa, con aspectos como seguridad, mantenimiento de máquinas de propósito general o impuestos [85].

El segundo paso es cuantificar para cada actividad el uso de recursos que requiere, empleando medidores de consumo de recursos como horas de operación, horas de ingeniería o dimensiones de las piezas a tratar [85]. Este paso es análogo en ambos enfoques para actividades de nivel unidad pero no para niveles superiores [86]. Los últimos pasos consisten en identificar los productos o servicios y los clientes de la empresa, y relacionarlos con unos costes de actividad usando medidores de consumo de actividades [85].

Después de determinar la forma más aceptada de modelizar los costes se ha revisado los distintos enfoques que los autores proponen para diseñar u optimizar diversos aspectos del ciclo de vida del producto atendiendo al coste, prestando especial atención a los parámetros empleados para definir las funciones objetivo.

Bertrand et al. evalúan cada alternativa para la distribución logística según el coste. Para actividades de transporte de componentes, emplean como indicador de consumo de recursos el volumen físico del submontaje, y para actividades de montaje, el tiempo de procesado. Cada planta tiene asociado un coste fijo independiente de la producción [51].

Amen presenta métodos para balancear la línea de montaje minimizando el coste por cada unidad producida, y emplea un modelo que tiene en cuenta el salario más alto asociado a trabajadores de las especialidades requeridas para la realización de cada actividad, asumiendo que un mayor grado de especialización comprende las especialidades asociadas a salarios menores. También plantea un coste fijo relacionado con el coste de capital medio [23].

Ganga et al. plantean evaluar la cadena logística teniendo en cuenta varios factores, entre ellos el coste. Para ello emplea como variables, medidas según el porcentaje de los ingresos que representan, el coste de planificación y financiación, el coste de transporte del inventario, el de las tecnologías de información requeridas, la adquisición de materiales, gestión de órdenes y el coste de los Bienes vendidos [58].

Otros artículos revisados presentan una evaluación de costes para la optimización de soluciones más sencilla: emplean un modelo sencillo de ecuaciones basado en el sumatorio del coste horario de cada recurso multiplicado por su asignación al proyecto [22][23][51][54][56].

Tang et al. plantean una variación interesante en su modelo para diseñar la cadena logística. La cadena se evalúa atendiendo al valor actual neto (VAN) del proyecto completo de la fabricación de un submontaje [55]. La actualización del valor se ha tenido en cuenta en la metodología propuesta para incluir las inversiones necesarias para el proyecto en la evaluación.

Kampker et al. plantean un método para planificar los procesos del montaje que también evalúa los costes asociados teniendo en cuenta el valor actual. Los autores definen varios indicadores de la adecuación de realizar determinadas inversiones. Se calculan realizando un sumatorio de las ventas y los costes e inversiones, ponderados según el porcentaje de interés y el período anual y lo obtiene su ratio respecto a la inversión inicial [35].

2.7 Curvas de aprendizaje

La metodología requiere, como se ha precisado anteriormente, del cálculo y estimación de tiempos. A lo largo de su aplicación en la generación de soluciones y para la evaluación de las mismas se requiere determinar el tiempo necesario para la finalización de las operaciones existentes. Tras aplicar las distintas reglas de cálculo definidas para el sistema, se reduce el problema a la determinación del tiempo requerido para la realización de operaciones simples, con unos recursos asignados dados.

En ese punto se ha incluido en el modelo el concepto de aprendizaje de los trabajadores, es decir, que el tiempo para ejecutar una determinada tarea varíe en función de las veces que se ha realizado la misma anteriormente, disminuyendo con cada repetición. La variación de ese tiempo según las veces que la tarea se ha repetido se conoce como curva de aprendizaje. De esa forma se puede estudiar cómo influye el número de la unidad que está siendo producida sobre una determinada solución conceptual del montaje, o cómo dicha solución varía a lo largo de la etapa de fabricación del ciclo de vida del producto.

Se ha realizado una revisión de trabajos relativos al concepto de curva de aprendizaje para determinar los principales enfoques. En la metodología no se ha pretendido incluir una manera innovadora de estimar la influencia del aprendizaje, sino únicamente aplicarlo siguiendo la aproximación más adecuada. A continuación se incluirá un breve repaso de la historia de este enfoque y de distintos trabajos que implementan el concepto.

La idea fue desarrollada por primera vez por Wright en los años 30, cuando trató de modelizar la influencia del aprendizaje en la realización de tareas manuales, mediante observaciones en la producción de aviones de la fuerza aérea de Estados Unidos. La Ley de Wright establece que, para cualquier operación que es repetida, el tiempo medio para su finalización se reduce en un porcentaje, denominado Coeficiente de Aprendizaje, cuando el número de repeticiones se duplica [91]-[96]. Es decir, si una tarea requiere m minutos para su realización la vez número n y tiene un coeficiente de aprendizaje C , para la repetición número $2n$ el tiempo requerido será de $C \cdot m$.

La forma más habitual de modelizar la función que determina la influencia del aprendizaje viene dada por una expresión del tipo de la Ec. 2.7.1, donde y representa o bien el tiempo para completar una tarea o el coste de la misma; a es una constante para ajustar el sistema; N representa el número de veces que se ha repetido la tarea o el número de producto fabricado y b es un parámetro de valor negativo [91]-[94].

$$y = a \cdot N^b \quad \text{Ec. 2.7.1}$$

Si se tiene en cuenta la propiedad dada por la Ley de Wright relativa a la reducción del tiempo al duplicar el número de repeticiones según el coeficiente de aprendizaje, LCI, se llegaría a la expresión de la izquierda de la Ec. 2.7.2, por lo que el parámetro b tendría un valor en función de LCI [92]. La Figura 16 muestra la evolución del tiempo requerido para completar una tarea en función del número de productos ensamblados, según distintos coeficientes de aprendizaje.

$$T_N = a \cdot [LCI]^{\log_2 N} \Leftrightarrow T_N = a \cdot N^{\log_2 LCI} \Leftrightarrow b = \log_2 LCI \quad \text{Ec. 2.7.2}$$

Figura 16: tiempos requeridos para completar una tarea según el número de productos fabricados.

La constante a tendrá un valor relacionado con un tiempo de referencia para un número de repeticiones dado. Así, se puede emplear expresiones del tipo de la Ec. 2.7.3, donde T_s es un parámetro denominado tiempo estándar y k es una constante mayor que 1, cuya función es compensar el valor anterior teniendo en cuenta el tiempo requerido para la primera repetición [91].

$$T_N = k \cdot T_s \cdot [LCI]^{\log_2 N} \quad \text{Ec. 2.7.3}$$

Sin embargo, expresiones del tipo de la Ec. 2.7.3 tienen el inconveniente de que tienden a un valor nulo para un número infinito de repeticiones, lo cual se puede considerar poco realista. Por esa razón Eden et. al. utilizan como expresión en condiciones normales la Ec. 2.7.4, cuyo límite es el valor T_s .

$$T_N = T_s \cdot [1 + k' \cdot [LCI]^{\log_2 N}] \quad \text{Ec. 2.7.4}$$

Los autores han estudiado, además, la influencia de distintos cambios debidos al tipo de proyecto. Por ejemplo, variaciones del tiempo estándar, propias de proyectos de desarrollo, conducen a curvas de aprendizaje con un perfil que va variando saltando entre los distintos miembros de la familia de curvas. En proyectos donde la complejidad aumenta a lo largo de subida, con un número de submontajes creciente, los autores concluyen que se obtiene una curva resultante en la que el tiempo estándar es mayor pero disminuye el coeficiente LCI [91].

El trabajo de Anzanello et. al. se basa en recopilar los principales enfoques y direcciones seguidas en la modelización del aprendizaje en tareas de fabricación. A parte del modelo logarítmico lineal, el empleado normalmente y seguido en las ecuaciones Ec. 2.7.1 a Ec. 2.7.4, citan el modelo Stanford-B., que tiene en cuenta la experiencia previa de los trabajadores; el modelo DeJong's, que incluye que parte de las tareas estén automatizadas y ejecutadas por máquinas; los modelos con perfil de "curva en S", que incorporan las características de los dos anteriores y el modelo Plateau, que sería el equivalente a la variación que proponen Eden et. al. [91] para evitar que la asíntota de la curva sea nula [93].

Jaber et. al. proponen un modelo para la estimación de tiempos en el que se incluye las tareas de repetición ocasionadas por errores. Dicho tiempo, según los autores, se va reduciendo a medida que el conocimiento sobre el proyecto aumenta y, por otro lado, las mismas tareas de repetición cada vez se completan en menos tiempo debido al fenómeno de aprendizaje, y fomentan un aprendizaje adicional para las tareas normales. Estos efectos se suman al del modelo habitual logarítmico lineal [94].

Morrison plantea un modelo más novedoso en el que se incorpora el fenómeno de olvidar aquello que no se practica al ir acumulando conocimientos de nuevos procesos. Se modeliza la ganancia de experiencia como un sistema que, si se estudia según los ejes de experiencia total acumulada y ganancia neta de conocimientos, cuenta con dos puntos de equilibrio estable, un valor muy bajo de conocimientos acumulados y un valor significativamente mayor. A partir de un número crítico de conocimientos acumulados totales, el sistema tiende hacia el segundo

punto de equilibrio, que sería lo deseado. Este enfoque, aunque interesante, tiene como objetivo la misma modelización del aprendizaje en lugar de su aplicación a la estimación de tiempos, de ahí su complejidad. Por ello no se ha incluido en el enfoque seguido al desarrollar la metodología [95].

Fioretti destaca como desventaja del modelo logarítmico lineal la dificultad de predecir el coeficiente LCI. En el modelo que el autor propone, se contempla que dicho coeficiente pueda variar entre plantas por la existencia de casos de no aprendizaje, o aprendizaje más reducido. En el modelo también se tiene en cuenta que la reducción del tiempo es mayor en actividades de montaje que en otras, como las de mecanizado. La propuesta se basa en el modelo de Huberma, e incluye la interacción entre los denominados “learners”, o unidades de la organización con capacidad para aprender. Por ejemplo, se incluye el aprendizaje obtenido de compartir conocimientos con otros nodos de la cadena de producción en función de la probabilidad de contacto entre dichos nodos [96]. De nuevo el enfoque tiene una complejidad elevada y no se ha seguido para la estimación de tiempos dentro de la metodología que se propone.

En conclusión del apartado, se considera que se ha hecho una revisión de los principales enfoques y de líneas de desarrollo seguidas actualmente, y se ha establecido los conceptos básicos para la inclusión de un modelo sencillo de aprendizaje en la estimación de tiempos y costes de la metodología. En la sección 5.5.6 se describe el modelo final implementado.

2.8 Conclusiones de la revisión del estado del arte

A continuación, se agruparán las principales conclusiones obtenidas tras revisar la literatura existente relativa a los campos detallados.

En cuanto a la planificación de procesos, las aproximaciones revisadas relativas a la fabricación en sectores con características muy distintas a las del aeronáutico no se adoptarán para la definición de la metodología, aunque sí se han seguido algunas consideraciones de los autores. La secuencia de montaje se definirá empleando las uniones entre componentes como restricciones. Asimismo se tendrán en cuenta las implicaciones del proceso de montaje definido en otras tareas del ciclo de vida como el diseño de la distribución en planta de las instalaciones y la definición de la cadena de suministro. Esto constituye un objetivo importante de la metodología propuesta.

Respecto a la definición de la línea de montaje, se concluye que existen diversas formas de plantearla según el enfoque del modelo de tiempos, con unos tiempos fijos, deterministas; con un enfoque estocástico o bien de tipo dinámico, incorporando unas curvas de aprendizaje.

La aproximación basada en el problema del equilibrado de la línea de montaje para dicha tarea está aceptada por la mayoría de autores. Además se puede llevar a cabo mediante una secuencia de toma de decisiones, y ser optimizada empleando métodos meta heurísticos.

Se considera probada la utilidad de asistentes para la definición de estructuras de productos y procesos de forma coherente con una modelización digital o iDMU de las instalaciones, productos y recursos, según un enfoque basado en la IC.

Como conclusiones de la revisión acerca de la definición de la red logística, se destaca que obtendrá mejores resultados si se ejecuta de forma integrada con la planificación de otros aspectos de la industrialización y con tareas del ciclo de vida que influyen sobre todo ello, como el diseño del producto.

Se considera probado por las aportaciones revisadas que el uso de la FL para evaluar la red logística obtiene generalmente buenos resultados. Se deduce la utilidad de la FL en dicho ámbito, dado que en muchos casos se debe recurrir a optimizar soluciones según varios criterios y a partir de información de la que no se puede obtener resultados concluyentes hasta la obtención de la solución completa.

Asimismo se plantea la aplicación de métodos meta heurísticos para resolver el problema de la optimización de la red logística, dado el carácter matemático de optimización combinatoria de tipo NP del mismo.

En cuanto a los métodos meta heurísticos, se puede concluir que las técnicas basadas en el algoritmo ACO se pueden aplicar a una gran variedad de problemas de optimización combinatoria. Como ventajas de dicho método, se suscribe que es susceptible de ser modificado o combinado según las necesidades que requiera cada aplicación, por lo que se considera flexible en cuanto a su implementación.

Respecto al empleo de la FL, se considera que la definición de un algoritmo borroso presenta diversas ventajas para su aplicación como sistema de evaluación multicriterio. Principalmente se desea citar su facilidad para desarrollarlo, para implementar el conocimiento dentro del sistema y para modificarlo en caso necesario.

Se considera que el método es eficaz en problemas de valoración de varios criterios relacionados con la fabricación, en campos como el control y optimización de procesos, la programación y planificación integradas de procesos, estrategias de fabricación y la gestión de la cadena de suministro.

Capítulo 3

Alcance

En este capítulo se incluye una descripción del alcance previsto para los desarrollos que se exponen en la tesis. Se considera que el alcance viene determinado por un punto de partida, en este caso unos antecedentes, y un punto que se pretende alcanzar. Este último se ha definido mediante la interpretación del problema que se busca resolver, los medios empleados para ello y los resultados esperados de los esfuerzos realizados. También se desea especificar las aportaciones concretas que la tesis incluye.

3.1 Antecedentes

El trabajo que ha conducido a la metodología que se presenta en la presente tesis doctoral se ha iniciado a partir de unos desarrollos previos llevados a cabo por Más como parte de propio doctorado [1]. Dichos desarrollos incluyen un modelo de actividades para la etapa del ciclo de vida del diseño conceptual de la industrialización, un modelo de información de Productos, Procesos y Recursos (PPR), un modelo de conocimiento de actividades de montaje y una aplicación prototipo de prueba de concepto.

A continuación se detallará cada uno de los aspectos mencionados, en los que se basan los desarrollos que se han tomado como punto de partida.

3.1.1 Modelo de actividades

Los antecedentes incluyen un modelo estructurado de las principales actividades que se deben completar para completar el diseño de la industrialización en fase conceptual. El modelo se formalizó según la metodología IDEF 0 o SADT (Técnica de Análisis Estructurado y Diseño). Ese tipo de diagramas son especialmente útiles para la representación de flujos de trabajo [1].

Estos diagramas incluyen un diagrama general de la producción de una aeroestructura, que el autor definió para dar una idea del contexto en el que se enmarcaba la etapa objetivo del ciclo de vida. A partir del diagrama general, se definieron modelos con un aumento progresivo del nivel de detalle, dirigiéndose hacia el diseño conceptual de industrialización. Finalmente, dicha etapa se modelizó de forma detallada.

Se ha adoptado el enfoque que los diagramas plantean para la definición del proceso de montaje en fase conceptual. Principalmente se ha tenido en cuenta para la determinación de tareas requeridas para su realización, lo que incluye la definición de la estructura As Planned, de la estructura As Prepared y de la línea de montaje.

Los modelos de actividades se han incluido y comentado previamente, en el apartado 1.3, para describir el enfoque que sigue la metodología para la definición conceptual del montaje. Se trata de la Figura 5, la Figura 6, la Figura 7, la Figura 8 y la Figura 9.

Figura 17: sección del producto del modelo de información PPR desarrollado por Más.

3.1.2 Modelo de Información

Los desarrollos presentados por Más también incluyen un modelo de información orientado a objetos con las clases necesarias para representar todos los elementos implicados, según su enfoque, en el diseño de industrialización.

El modelo de información PPR se modelizó empleando el lenguaje de modelado UML. La Figura 17 muestra el diagrama UML de parte del modelo. La parte mostrada es la relativa al producto. Se puede observar que se incluye en el modelo una clase denominada *industrial_node*. Dicha clase representa cada uno de los puntos de la línea de montaje conjunta donde se ensamblaría un sub montaje. Por lo tanto, mediante dicha clase y la relación de composición con objetos del mismo tipo, es posible definir la estructura As Planned por completo.

El modelo completo incorpora, además, áreas de procesos y recursos. El diagrama UML completo se ha incluido en el Capítulo 13, como anexo.

Para el desarrollo de la metodología se empleó inicialmente el modelo creado por Más. Sin embargo, al intentar emplearlo para las tareas relacionadas con los nuevos métodos propuestos en este trabajo, se hizo patente que se requería una extensión y una modificación del modelo inicial. Se definió, por tanto, un nuevo modelo de clases, a partir del inicial, para que diera soporte a la implementación de los métodos que se pretendían incluir.

El modelo desarrollado para la metodología incorpora, respecto al inicial planteado por Más, un enfoque más centrado en la representación de objetos vinculados a la industrialización según el enfoque planteado, sin incluir elementos no presentes en la interpretación de dicha etapa que se propone. Además, el modelo que se propone se ha diseñado dotándole de un carácter general siguiendo el concepto de meta clases, dado que habrá de ser capaz de soportar los modelos PPR específicos de cada caso de industrialización. En el apartado 5.2, se explicará en detalle el meta modelo propuesto.

3.1.3 Modelo de conocimiento de Procesos

Junto con el modelo de información PPR descrito anteriormente, la propuesta tomada como punto de partida incluía un modelo de conocimiento de los procesos que podían tener cabida en el diseño de industrialización.

Dicho modelo estaba formado por un conjunto de procesos de montaje que se desglosaban en operaciones simples. La Tabla 1 muestra el desglose de uno de dichos procesos definidos, denominado unión metal-metal.

Las operaciones del modelo de conocimiento se podían relacionar con la vista As Prepared gracias a las uniones entre componentes, y así se planteaba la posibilidad de definir las actividades del proceso de montaje. Por ejemplo, si un producto requería la ejecución de dos uniones, la vista As Prepared definida implicaba la secuencia en que se deberían completar, las propiedades de los componentes determinaban los tipos de las uniones, y el modelo de conocimiento lo asociaba con un conjunto de operaciones de montaje. De esa forma se planteaba que era posible obtener un plan de procesos preliminar sobre el que trabajar.

En la metodología que la presente tesis plantea, se ha empleado la idea de Más de generar el plan de procesos a través de las uniones requeridas y unas operaciones asociadas, si bien el concepto de un modelo de conocimiento de procesos único se ha eliminado para posibilitar el uso con distintos modelos de procesos concretos. La estructura de los modelos específicos que se plantea en la metodología avanza respecto al concepto de modelo de conocimiento de Más, dado que se añaden también recursos a las actividades, y cada objeto, presenta un conjunto de atributos que permiten la definición de reglas complejas.

3.1.4 Aplicación prototipo con definición de estructuras de producto y evaluación de repercusiones

Los modelos propuestos por Más se implementaron en una aplicación prototipo para demostrar su validez [1].

En concreto, ese demostrador de concepto permitía definir unas estructuras As Planned y As Prepared para un producto dado, crear una representación simplificada del proceso de montaje, asignar recursos de forma interactiva y definir propiedades. La aplicación prototipo incluía unas reglas sencillas que permitían calcular algunos parámetros básicos de costes y tiempos.

Operación de montaje	Observaciones
Taladrar a diámetro previo desde dentro hacia fuera los taladros testigo.	Manual.
Pinzar para sujeción los taladros testigo.	Manual.
Taladrar a definitivo, escariar y avellanar.	Manual o automático.
Separar, limpiar y rebabar.	Manual.
Aplicar sellante de interposición.	Manual.
Cerrar y pinzar. Curado del sellante.	Dependiendo de los tiempos de curado no se espera a que el sellante este curado para empezar a remachar.
Remachar según mapa de remachado.	Manual o automático.

Tabla 1: descomposición de la operación de unión tipo metal-metal en actividades básicas, en el modelo de Más [1]

Figura 18: interfaces del prototipo demostrador de los modelos de Más [1].

Para probar la aplicabilidad de este prototipo se ejecutó un caso de uso en el que se definió una propiedad de localización de cada nodo industrial y una regla que, según el valor de dicha propiedad, y unos medios de transporte seleccionados, calculaba de forma muy aproximada los tiempos y costes del transporte.

El prototipo probaba la validez de los modelos, y además demostraba que era factible automatizar y asistir en un entorno CAD/CAM tareas del diseño de la industrialización, como generar nuevas vistas o estructuras de componentes de un modelo de producto dado, generar procesos con una estructura coherente con ellas y definir una red logística sencilla de plantas comunicadas entre sí por transportes.

Por lo tanto, el prototipo demostraba que los conceptos que se habían desarrollado en dicha tesis eran aplicables. Por ejemplo, permitía a un usuario asignar un recurso, pero no definir los recursos de una línea; o demostraba que era posible definir unas reglas que evaluaran una solución, pero no presentaba un modelo de cálculo sistematizado. Si bien el demostrador únicamente probaba la aplicabilidad de los conceptos, es un punto de partida necesario para los desarrollos que se plantean en esta tesis.

La Figura 18 muestra la interfaz de la aplicación prototipo, concretamente las pestañas para la definición de propiedades y asignación de recursos a las operaciones de montaje.

3.2 Interpretación del problema

En este apartado se describirá la interpretación del problema conjunto que se pretende resolver mediante la aplicación de los desarrollos realizados en esta Tesis. Se detallará y justificará la sub división en problemas acoplados y la forma de tratar cada uno.

La presente tesis doctoral propone una metodología desarrollada para asistir al diseño o definición, en su fase conceptual, de la industrialización de productos del sector aeronáutico. Dado que se ha orientado principalmente para la fabricación de productos finales, al hablar de industrialización se hace referencia al proceso de montaje.

En el Capítulo 2 se discutió que el montaje de productos en el sector aeronáutico implicaba una serie de particularidades que imponían restricciones adicionales a la definición del proceso de montaje. Concretamente, en la metodología se ha tenido en cuenta la deslocalización de la línea de montaje, las dimensiones y el peso de los componentes, superiores a la mayoría de productos y la implicación de participantes de distintos países.

Para desarrollar la metodología que se presenta, se comenzó definiendo una interpretación del tipo de problema que se pretendía solucionar, teniendo en cuenta las consideraciones descritas anteriormente. Se ha tenido en cuenta que para abordar un problema del mundo físico, real, es imprescindible un modelo del mismo; será dicho modelo lo que finalmente es resuelto, dado que no es posible abarcar todos los parámetros que influyen en la realidad. La modelización surge a partir de una primera interpretación, y, en este caso, el modo de generarla surgió de la representación del tipo de soluciones que se pretendía obtener.

Para un caso específico o instancia del problema de la definición conceptual del proceso de montaje de un producto, con las restricciones de deslocalización de la línea, grandes dimensiones y pesos y reparto industrial internacional, una representación de una solución podría ser la mostrada por la Figura 19.

Figura 19: representación de una solución para una instancia del problema según se propone.

Se puede observar que el producto que se pretende industrializar está separado según su estructura As Planned, en grupos de componentes o sub montajes: los motores; el fuselaje con la sección de cola, divididos a su vez en fuselaje delantero, central y empenaje; y las alas junto con el cajón central. Cada uno de esos sub montajes se debe ensamblar en una línea de montaje, que deberá ser definida en cuanto a estaciones, operaciones, recursos necesarios y la distribución en planta.

En la Figura 19 cada sub montaje aparece relacionado mediante una línea gris con la línea donde se fabricará. Las líneas de montaje requeridas tendrán que asignarse a unas plantas industriales de entre un número de plantas candidatas. La localización de dichas plantas impondrá las necesidades de transporte. En la figura, cada línea aparece unida, mediante una línea verde, con una planta existente, representada como un círculo de color verde oscuro en el mapa. Los círculos amarillos representan otras plantas disponibles que no han sido seleccionadas. Las líneas negras discontinuas representan los transportes de componentes entre localizaciones necesarios para llevar a cabo la producción.

A partir de una solución como la descrita, se definió una solución genérica, mediante la cual se obtuvo la interpretación buscada. Atendiendo a la estructura de las posibles soluciones, se consideró un problema con varias vertientes: subdivisión en sub montajes definición de líneas de montaje y de la red logística.

En primer lugar es necesario dividir el producto en sub montajes. Ello determina la forma en que se repartirá la carga industrial, y es el primer paso para definir la secuencia de montaje final. La sub división del proceso según una estructura de sub montajes se corresponde con el enfoque seguido en el sector aeronáutico para la definición del montaje, y dicha estructura es la vista As Planned del modelo del producto [1][9][16][17].

A partir de la estructura As Planned, queda definido el número de nodos industriales requerido para el proceso de montaje. Otra de las vertientes planteadas del problema es la definición de la línea de ensamblado mediante la cual se fabricará cada sub montaje. Se considera definir cada línea, dado el nivel conceptual al que se orienta la propuesta, a determinar las operaciones de montaje requeridas, disponerlas en una secuencia temporal y repartirlas entre un número de estaciones, todo ello, respetando unas restricciones de precedencia, y definir y asignar una cantidad suficiente de recursos para su ejecución.

Además de determinar los recursos y los procesos de las líneas de montaje, se ha considerado como parte de la definición conceptual la creación de una distribución en planta de los elementos implicados. Se podrá llevar a cabo mediante una representación digital o modelo CAD de cada recurso seleccionado y de los componentes involucrados.

La última vertiente para definir una solución factible es determinar las plantas donde se ejecutará el ensamblado de cada sub montaje y determinar el modo de transporte entre las elegidas. En la metodología, se propone que este paso de la resolución se efectúe de forma automática, según un método de optimización. A este paso se le ha denominado definición de la distribución logística.

Los aspectos descritos anteriormente se deben cubrir para hallar una solución factible del problema. Sin embargo, también se ha incluido como parte de dicho problema encontrar soluciones de calidad, entendido el concepto de calidad en este caso como que son soluciones cercanas a la óptima. El que una solución sea factible no garantiza que sea la mejor, ni siquiera que sea de cierta calidad, por lo que se debe añadir otra parte al problema. Esta vertiente adicional consiste en evaluar las soluciones generadas y determinar cuál es la mejor.

Por tanto, el problema, tal y como se interpreta en la metodología, se compone de varias vertientes o sub problemas. Se debe remarcar que esas facetas no son independientes entre sí, sino que la solución parcial de una afecta a las posibilidades para el resto. Por ejemplo, si uno de los sub montajes definidos tiene cierta altura máxima, la planta industrial que se elija para albergar la línea de montaje correspondiente deberá tener techos lo bastante altos para que el proceso se pueda completar. Si un sub montaje tiene cierto peso, el transporte que se seleccione para llevarlo al siguiente nodo debe tener una capacidad de carga adecuada. O bien si se obtiene un tiempo de ciclo de las líneas definidas, los transportes requeridos deberán ajustarse a dicho plazo, o el tiempo de ciclo aumentará. Dadas todas las sinergias descritas, se dice que los problemas descritos están acoplados

La secuenciación de los pasos que se deben dar para la resolución no es algo trivial, dadas las influencias mutuas entre distintas partes. Es necesario que la definición de la estructura As Planned se realice primero. Las evaluaciones deben ejecutarse en último lugar. La definición de líneas de montaje, la definición de la distribución logística y la distribución en planta, en cambio, no se deben completar en ningún orden particular. En la metodología, se impone la condición de que la distribución en planta sólo se pueda realizar después de la definición de la línea, y el resto de la secuencia queda en manos del usuario. En la etapa de optimización automática de la distribución, las soluciones parciales variarán en función de los aspectos determinados al resolver las otras partes del problema.

Con esto se considera planteada la visión del problema del diseño conceptual del proceso de montaje que se ha seguido al desarrollar la metodología. En los próximos apartados se explicará los aspectos innovadores de la metodología propuesta y los medios empleados para su definición.

3.3 Aspectos innovadores de la tesis

En los apartados previos de este capítulo se ha descrito los desarrollos previos que se han tomado como punto de partida para la creación de la metodología, así como la forma de entender el problema que se busca resolver. En esta sección se discutirán las aportaciones que se proponen con respecto a los antecedentes para encontrar soluciones a dicho problema.

Aproximación integrada y Conocimiento

Una de las aportaciones que se debe destacar es el enfoque integrado de la definición de los procesos de fabricación del proceso de montaje, junto con la de la red logística, es decir seleccionar unas instalaciones existentes para cada línea de montaje y los transportes de componentes entre las elegidas.

Ya existe metodología desarrollada para la definición de la línea de montaje y el diseño de la cadena de suministro. Además, en la bibliografía consultada existen aproximaciones en las que se acomete de forma integrada una definición logística y algunos aspectos del diseño de la industrialización [44][51][62][63]. Sin embargo la solución conjunta incluyendo la distribución en planta no es una opción desarrollada. Se ha creado una nueva metodología que permite el enfoque integrado de dichos problemas.

Las soluciones a las distintas partes son coherentes entre sí, gracias al empleo de un conocimiento compuesto por un conjunto de reglas y restricciones que se describirán en apartados posteriores.

Implementación de métodos

Se considera también una aportación significativa la definición de unos métodos específicos para la generación de los diversos aspectos de las soluciones para el diseño de industrialización, tal y como se interpreta en la propuesta.

Para definir la línea de montaje se propone un método en el que se define gran parte de la secuencia de forma automática a partir de decisiones estratégicas del usuario, como la estructura As Planned y la ordenación de operaciones de unión. El usuario define las estaciones sujetas a restricciones tecnológicas, de disponibilidad de recursos y de espacio; este proceso se puede simultanear con la definición de la distribución en planta.

Para la definición de la distribución logística se ha desarrollado un algoritmo metaheurístico de Optimización por Colonia de Hormigas (ACO). Este tipo de algoritmo se inventó en la década de los 90 y se ha aplicado a problemas de optimización combinatoria [40]-[43]. Se considera como aportación la formulación matemática del problema de la distribución logística, la demostración de su carácter de problema NP (cuya resolución por métodos exactos no es factible) y el desarrollo de un algoritmo basado en la técnica ACO para la optimización de la elección de instalaciones y medios de transporte que las comuniquen, según múltiples parámetros del sistema, como peso de los componentes, dimensiones, costes de transporte y de uso de las plantas. En el apartado 6.1 se proporciona una explicación detallada de todo lo anterior.

Creación del procedimiento

La definición de una secuencia en la que se ejecutan las distintas tareas a las que se desea dar soporte es, en sí misma, una aportación. Las restricciones entre las vertientes de la industrialización, tal y como se ha modelizado, hacen que no exista ninguna secuencia óptima.

Se propone una secuencia cíclica o iterativa, según la cual, se comienza definiendo uno de los aspectos comentados partiendo de información genérica extraída de proyectos previos. La definición de este aspecto aportará información que limitará la definición de los otros, lo que a su vez generará nuevos datos que aporten una mayor precisión para obtener una nueva solución parcial al primer aspecto. Tras ello se puede continuar el ciclo o evaluar las soluciones obtenidas hasta el momento.

El procedimiento según el cual se aplica la metodología se describe en el Capítulo 7. Dedicando un primer apartado para detallar la secuencia general cíclica y el resto para los distintos subprocesos o etapas que engloba.

Modelo

Ha sido necesario crear un modelo de datos que pueda soportar toda la información que se debe manejar durante la ejecución de la aplicación. Se ha partido del desarrollado por Más [1], y se ha modificado para cubrir las necesidades de gestión de información de los métodos desarrollados. Se requerirán soportar un modelo de costes, los tiempos y la gestión de la incertidumbre.

La estimación de costes se realizará con una orientación a actividades. Se calculará el coste de cada actividad mediante el coste de utilización de sus recursos asignados. Cada actividad tendrá un impacto sobre cada ciclo de la producción. Este enfoque se detalla en el apartado 5.5.

De manera análoga, el tiempo también se debe incluir en el modelo, dado que es uno de los criterios para evaluar soluciones. No tendrá tanto impacto sobre el modelo original, puesto que no requerirá la adición de nuevas clases, únicamente de atributos y métodos de clases existentes. Se tiene en cuenta el tiempo de ciclo, tanto de ejecución de las operaciones, como de transporte o de entrega de cada nodo También se describe en el apartado 5.5.

Sistema de evaluación de soluciones

Se ha pretendido desarrollar un modo de evaluar las soluciones factibles definidas, de forma que se pueda distinguir la alternativa más adecuada. Se ha creado un sistema de evaluación multicriterio que toma en consideración diversos factores relativos a tiempos, costes y utilización de recursos. Todos los criterios mencionados son ponderados según unas reglas justificadas para elaborar una puntuación o “ranking”.

El sistema definido se basa en la teoría de la lógica borrosa, y emplea la aproximación denominada algoritmo borroso, desarrollado por Zadeh en 1968 [71][72][73][76]. La aportación ha consistido en seleccionar los parámetros que definen esta aplicación concreta del algoritmo y, además la inclusión de una modificación para introducir la incertidumbre de manera explícita en las variables de entrada, como se detalla en el apartado 6.2.3.4. La explicación detallada de la definición del método y la justificación de su elección proporciona en todo el apartado 6.2.

3.4 Medios utilizados

Para la elaboración de la metodología ha sido necesaria la realización de un trabajo considerable en varios ámbitos, para el cual se ha utilizado cierto número de medios, cada uno adecuado para el desarrollo según uno de los campos involucrados. A continuación se describen todos ellos según si se emplearon para la implementación de la metodología o la formalización de su definición misma.

3.4.1 Medios para la implementación

La implementación de la metodología que se propone se basa en gran medida en la automatización de tareas que, de otro modo, se ejecutarían de forma interactiva en el entorno CATIA V5. Las opciones de automatización disponibles para dicho entorno tradicionalmente se han posicionado en un diagrama piramidal que contrapone la capacidad de personalización y facilidad de uso. La Figura 20 muestra dicho diagrama.

La punta de la pirámide representa el entorno CAA que permite hacer un uso directo de la arquitectura abierta con la que se diseñó CATIA y posibilita la definición de nuevas funciones, comandos e incluso módulos. CAA es un entorno de desarrollo que permite la ampliación de CATIA según cualquier orientación que se requiera. En contraposición, plantea muchas dificultades. En primer lugar, requiere conocimientos de programación C++ de alto nivel [87], pues implica el uso de recursos como punteros, punteros a punteros, e interfaces complejas. Además la información de todas las funciones existentes es muy escasa, y difícil de acceder [87], por lo que el camino a seguir para cada desarrollo no se suele conocer sino mediante el método de “prueba y error”. Por último, la utilización de CAA requiere de una licencia especial que proporciona Dassault Systèmes, la empresa desarrolladora, y que tiene un alto precio.

El siguiente peldaño es la automatización VBA, que permite una adecuada personalización y mucha mayor facilidad para el desarrollo. Ésta es la opción que se ha utilizado para la codificación de la implementación de la mayor parte de la metodología.

Figura 20: medios para automatizar procesos en la herramienta CATIA V5 [83]

El módulo de conocimiento incluido dentro del entorno mismo de la aplicación CATIA (de la misma forma que el módulo de modelado de sólidos o ensamblajes) permite la definición de fórmulas y reglas que relacionen los parámetros y propiedades de los elementos del entorno, como piezas, productos y procesos. Esta opción se ha empleado para tareas secundarias, aunque existe la posibilidad de implementar todas las reglas de cálculo de tiempos y costes directamente en el sistema mediante el módulo descrito. Dicha opción no se ha explotado por limitaciones de tiempo de desarrollo, pero su estudio es una dirección a seguir incluida dentro de los desarrollos futuros.

El peldaño más bajo del diagrama, lo ocupa la utilización del entorno CATIA V5 de la manera convencional, pero empleando los parámetros y propiedades de los elementos que forman parte de él. Esta opción también se ha utilizado, principalmente para el almacenamiento de algunos valores de parámetros.

El trabajo de implementación llevado a cabo, dirigido al desarrollo de una aplicación que permitiera ejecutar la metodología que se propone desde el entorno CATIA, se describe de manera detallada en el Capítulo 8.

CATIA VBA Automation

La mayor parte de la implementación de la metodología propuesta se ha codificado empleando la opción de automatización VBA (Visual Basic for Applications) que incluye dicha aplicación. Esta opción permite la creación de proyectos de automatización compuestos por estructuras de clases, interfaces y subrutinas.

Además, la automatización VBA posibilita la grabación de macros que generen código a partir de la realización de acciones interactivas en el entorno CATIA. Sin embargo este procedimiento no está disponible para la mayoría de módulos relacionados con el diseño de procesos.

Aunque el entorno de desarrollo de la automatización VBA ofrece facilidad en su utilización, incorpora restricciones adicionales al lenguaje Visual Basic tradicional, lo que en algunos casos ha forzado a añadir funciones auxiliares que disminuyen la eficiencia del sistema programado. Por esta razón se considera que el medio que se describe puede ser adecuado para la creación de una primera implementación que demuestre la aplicabilidad de los conceptos que se proponen, pero para el desarrollo de un prototipo formal, se estima necesario el uso de una plataforma para el desarrollo de código que sea independiente de CATIA V5.

CATIA nativo, V5 R21

La implementación desarrollada se debe ejecutar dentro de la herramienta CAD/CAM CATIA. Por ello para todas las pruebas del sistema ha sido necesaria su utilización.

Por otro lado, todos los modelos de producto y recursos que se han empleado para los casos de estudio se han definido mediante CATIA V5. Se han creado maquetas digitales de las aerestructuras cuyo montaje se ha definido y de los recursos existentes en los modelos concretos PPR generados.

Además, la aplicación utiliza a menudo las propiedades asociadas a los distintos elementos del entorno CATIA (como productos, piezas individuales o actividades) para almacenar información de cada solución específica.

Microsoft Excel 2007

Para la implementación de varios aspectos incluidos en la metodología ha sido también muy útil el empleo de la aplicación Excel. El sistema de evaluación basado en la Lógica Borrosa, por ejemplo, no se ha codificado, sino que se ha implementado en una hoja de cálculo en la que se aplican todas las reglas que definen el sistema a unos datos de entrada. Únicamente se ha codificado la forma de acceder a dichas hojas. La aplicación prototipo desarrollada, cuando se pulsa un determinado comando, abre de forma interna las hojas de cálculo e introduce en las casillas adecuadas los valores de entrada y extrae el valor final de salida.

Asimismo, se ha empleado Excel como repositorio para la creación de los modelos específicos de procesos y recursos, que incluyen tipos de actividades simples y compuestas, con sus respectivos atributos, tipos y modelos de recursos, tiempos de ejecución de actividades genéricas y distancias entre las localizaciones definidas. El empleo de Excel ha supuesto una gran comodidad para la inclusión de modificaciones en los modelos. De nuevo, se ha implementado de forma que el sistema de forma interna lee la información de los archivos Excel vinculados.

3.4.2 Medios para la definición de modelos

Previamente a su implementación, han sido necesarias la creación y formulación de unos modelos que sirvan como base a la definición misma de la metodología. Son tanto, modelos de información con orientación a objetos, como modelos de actividades que representan un flujo de ejecución. A continuación se detallan los medios empleados para las tareas de modelado.

Microsoft Visio 2007

Los modelos orientados a objetos definidos para soportar la metodología se han formulado empleando esta herramienta desarrollada por Microsoft. Permite la generación de modelos según el lenguaje formal UML. Además, el entorno de la aplicación permite otras opciones interesantes como la elaboración de figuras o diagramas de forma libre. Muchas de las figuras presentadas en el presente documento han sido creadas mediante la utilización de MS Visio.

Enterprise Architect V9.0

La aplicación Enterprise Architect permite la creación de cualquier modelo formal que se encuentre en alguno de los dominios que abarca el lenguaje UML. La aplicación se ha utilizado para la generación de diagramas de actividades, principalmente para modelar los diagramas de flujo de las funciones y subrutinas programadas.

3.5 Resultados esperados

En este apartado se expondrá los resultados que se pretendió obtener al iniciar los trabajos de desarrollo. Se considera importante tener presente el punto que se quiere alcanzar para poder realizar una planificación y ejecución de los trabajos necesarios adecuada.

Evidentemente, desarrollar la metodología que se propone de forma plena implicaría una definición formal exhaustiva de todos sus detalles y la creación de una aplicación software que la implementara completamente, lo que a su vez requeriría, además de la generación de código y modelización, un proceso de pruebas y análisis de fallos y asegurar la total compatibilidad con la herramienta CATIA V5; y probablemente se debiera emplear otra plataforma para la programación, en lugar de el entorno VBA para automatización.

Por tanto, para un desarrollo total de la metodología sería necesario dedicar un número de horas de personal muy superior al que se recomienda para que un doctorando complete su tesis, y emplear unos recursos y conocimientos multidisciplinarios.

Dado que no se contaba con los medios descritos, nunca se pretendió un desarrollo formal que obtuviera como resultado una aplicación apta para una futura comercialización.

En su lugar, se encaminó todo el trabajo a la elaboración de una metodología que produjera soluciones a un problema cuya modelización también se incluía en los desarrollos. Las soluciones obtenidas han de ser factibles según las restricciones definidas en el modelo, y serán finalmente evaluadas para determinar la más adecuada. La implementación industrial completa de dicha metodología no es el objetivo último de los esfuerzos realizados, sino una forma de validarlos, un medio que facilite la ejecución de unos casos de estudio y una forma de demostrar su viabilidad.

Otro aspecto sobre el que se desea llamar la atención son las mismas soluciones que se pretenden obtener para el problema del diseño de la industrialización. La aplicación desarrollada está ideada para definir soluciones factibles, que vendrán definidas por una distribución de toda la carga industrial en un número de nodos, cada uno de los que estará asignado a una planta disponible y unos medios de transporte para todos los movimientos del producto necesarios. Cada posible solución se evaluará. Estos son los aspectos incluidos dentro del modelo del problema elaborado, y son los que se busca resolver

Es importante comentar también el nivel de detalle buscado en las soluciones. Dada la complejidad que supone el enfoque conjunto de las vertientes del problema enumeradas, la inclusión de un número demasiado alto de parámetros a considerar ralentizaría en exceso la ejecución. Por tanto, las soluciones tendrán un nivel de detalle bajo que permita lidiar con los distintos problemas en conjunto.

Este nivel de detalle es coherente con la etapa conceptual del diseño de la industrialización para la que está ideada la aplicación. Incluso, debido al enfoque concurrente, el modelo del producto no ha de estar totalmente detallado en este punto. Una de las ideas básicas buscadas es dejar clara la vía de desarrollo más propicia para que los diseñadores puedan continuar incrementando el nivel de detalle. En otras palabras, la metodología permite encontrar la definición básica más favorable, a partir de ahí la solución se deberá seguir definiendo fuera del alcance de la metodología.

Se puede concluir, por tanto, que con el trabajo realizado se ha pretendido obtener una metodología para la generación de la solución más adecuada del diseño conceptual de la industrialización, según se ha modelado. Para demostrar la validez y la viabilidad de dicha metodología, se debe realizar una implementación que permita la ejecución de unos casos de estudio. Esfuerzos más allá de lo descrito quedarían fuera del alcance de la presente tesis doctoral, y se incluyen como desarrollos futuros en el Capítulo 11.

Capítulo 4

Objetivos

En este capítulo se describe los objetivos perseguidos en esta tesis doctoral. En esencia, se trata de un objetivo global para cuya consecución se ha definido unos objetivos específicos, cuantificables y cuyo cumplimiento es más sencillo de evaluar. En el Capítulo 10 se incluye una valoración del grado de cumplimiento de cada uno, así como del cumplimiento del principal.

El objetivo principal de esta tesis es el desarrollo de una metodología que permita diseñar a nivel conceptual el proceso de montaje de un producto del sector aeronáutico. Más concretamente, se persigue la generación de soluciones factibles para dicho proceso y su evaluación, de manera que se posibilite la elección de una de ellas de manera justificada. La idea detrás de todo ello es la selección de la alternativa más adecuada ya desde las primeras etapas del diseño del proceso, de forma que se evite tener que introducir ningún cambio significativo en etapas más avanzadas, o incluso durante el mismo proceso de industrialización, con los consiguientes retrasos y sobrecostes.

El objetivo principal se puede desglosar en un conjunto de objetivos específicos que determinen su cumplimiento. Se puede considerar que se corresponden con las prestaciones o funciones que cubre la metodología, que se describen a continuación:

- *Asistir en la generación de soluciones conceptuales de calidad y factibles para el proceso de montaje*

La metodología se ha proyectado con la idea de asistir a los diseñadores de procesos en la toma de decisiones que conduce a la obtención de una solución completa del proceso de montaje del producto. Recopila todas las acciones que se consideran necesarias y las divide en un conjunto de bloques que se deben ejecutar respetando un orden. Las decisiones que tome el diseñador deben estar asistidas mediante información acerca de las repercusiones de cada opción y el estado de la solución en ese momento. Durante los distintos pasos se podrá definir y estudiar distintos escenarios y variantes.

Para cada solución, la aplicación de la metodología debe conducir a la obtención de una distribución de la actividad industrial del proceso de montaje en un número de plantas industriales; un plan de transportes que comunique dichas plantas y, para cada una de ellas, un plan de procesos de la línea de montaje definido hasta el nivel de tarea simple, con los recursos y productos asignados a cada operación del mismo y un diseño preliminar de la distribución en planta.

Los procedimientos que no requieran de ninguna decisión, se ejecutarán de manera automática, de forma que los esfuerzos de los diseñadores se puedan concentrar en las tareas que aporten valor a una solución. La metodología debe asistir en la definición de los distintos aspectos que determinan una solución, asegurando que las soluciones parciales obtenidas son compatibles entre sí, lo cual es un requisito para que se considere factible dicha solución.

Objetivos

▪ *Comparar las alternativas definidas*

La metodología debe incluir un sistema para comparar las soluciones resultantes de su aplicación, y que permita la selección de la más adecuada. Los criterios de dicho sistema deben estar definidos de manera justificable, y ser accesibles para los diseñadores.

El sistema de evaluación debe tener en cuenta más de una entrada, para de esa forma valorar cada solución teniendo en cuenta múltiples características de la misma.

▪ *Evaluar un proceso de montaje definido a nivel conceptual*

Además de la posibilidad de evaluar una determinada solución en términos que permitan su fácil comparación con otras, se requiere que la metodología permita la evaluación de aspectos de la propia solución. Se tratará de aspectos relacionados con costes, tiempos y eficiencia, para los que se debe tener en cuenta la incertidumbre asociada.

Este tipo de evaluaciones permitirá la definición de variantes partiendo de una solución generada, incluyendo cambios para mejorar algunos aspectos de la misma. También posibilitará valorar el impacto de la variación de algunas condiciones sobre parámetros del proceso como el coste o el tiempo de entrega. El modelo deberá incluir fenómenos de aprendizaje y su influencia sobre la duración de las tareas, dependiendo de las repeticiones acumuladas, o del número de unidades producidas.

▪ *Facilitar el desarrollo de una solución a niveles de detalle mayores*

Si bien la metodología se enfoca a un nivel de definición conceptual del proceso de montaje, las soluciones que se obtengan tras su aplicación deben poder servir como punto de partida para etapas más avanzadas del diseño del proceso de montaje.

Una gran parte de los trabajos realizados han tenido como objetivo el desarrollo de una aplicación prototipo que implemente la metodología diseñada. Esto no constituye un objetivo en sí mismo, el objetivo es la creación misma de la metodología. Sin embargo, las tareas de implementación de esta metodología son imprescindibles para la validación de la misma, es decir, la demostración de que es viable y cumple los distintos objetivos específicos planteados.

La implementación de la metodología mediante el desarrollo de una aplicación prototipo no es suficiente para su validación. Se requiere, además, utilizar dicha aplicación en la ejecución de unos casos de estudios que demuestren su aplicabilidad y que muestren los resultados obtenidos.

En conclusión, se puede resumir que la tesis persigue la creación de una metodología que facilite el diseño conceptual del proceso de montaje de un producto, y que cubra una serie de especificaciones: asistir durante la definición de cada solución, aportando la información necesaria y automatizando tareas rutinarias; permitir comparar varias soluciones y elegir la más conveniente; facilitar la exploración de escenarios y variantes y servir como punto de partida a etapas más avanzadas. Todos esos aspectos podrán ser validados a través de la implementación de la metodología en una aplicación prototipo, en la que se ejecutarán unos casos de estudio.

Los próximos capítulos se dedican a recoger los distintos aspectos del diseño de la metodología, empezando por los modelos en los que se apoya.

Capítulo 5

Modelos

El quinto capítulo de la tesis se ha destinado a la descripción de los modelos en los que se apoya la metodología desarrollada. Si la metodología provee al usuario de las herramientas para crear el proceso de montaje, se puede considerar que los modelos permiten la creación de dichas herramientas. Siguiendo otro símil, si se representa el diseño del proceso de montaje como un juego de construcción, en el que cada solución es una edificación de juguete, la metodología establecería cómo se deben apilar los bloques (formas de encajarlos, orden que se debe seguir), mientras que los modelos determinarían la composición de dichos bloques (formas y tamaños).

La metodología se apoya en varios modelos, algunos de los cuales se han creado específicamente mientras que otros se han adaptado de modelos previos. Se emplea un modelo general, denominado meta modelo, que establece las clases de elementos principales que estarán implicados en la definición de soluciones conceptuales del proceso de montaje. Cada caso concreto de producto tendrá asociado, además, un modelo específico que recogerá los tipos de procesos y recursos que se tendrá en cuenta para su montaje.

El problema mismo de la generación de soluciones conceptuales del proceso de montaje se ha modelizado, descomponiéndolo en varias facetas relacionadas entre sí. La faceta correspondiente al plan logístico implica un modelo específico. La forma de calcular los distintos valores de tiempos y costes del proceso, y de incluir la incertidumbre asociada también constituye un modelo en sí mismo.

En el capítulo, se comenzará describiendo la modelización del problema que se considera. Se continuará con el meta modelo general, que es una adaptación del modelo de información propuesto por Más [1]. Posteriormente se definirá los modelos concretos que deben emplearse en cada caso de montaje. En el cuarto apartado del capítulo se detallará el modelo de la red logística desarrollado. Por último, se explicará el modelo de tiempos y costes, así como la forma de tener en cuenta la incertidumbre y los procesos de aprendizaje en las tareas realizadas por operarios.

5.1 Modelización del problema completo

En el apartado 3.2 se ha discutido la necesidad de una modelización del problema que se considera resolver, y cómo dicho paso se realizó a partir de la interpretación de una posible solución válida. En este apartado se detallará el modelo del problema que se generó finalmente, sus distintas vertientes, soluciones parciales e información de partida.

El problema, por tanto, se considera compuesto por un número de sub problemas. La solución vendrá dada por la unión de las distintas soluciones parciales, teniendo en cuenta el acoplamiento entre las mismas. Este apartado, para describir el modelo del problema, detalla en primer lugar la descomposición del mismo y las características de cada parte, así como las interacciones entre ellas.

El problema también presenta unas condiciones de contorno o condiciones iniciales, esta información de partida para el proceso de resolución también forma parte de la modelización y se describe a continuación. La aplicación de la metodología con la información de partida conduce a soluciones conjuntas de todas las partes, que se consideran factibles si son compatibles con todas las restricciones; las características de una solución factible también se detallan en el apartado. Sin embargo, la obtención de soluciones parciales no es el objetivo final de la metodología, sino que se busca una evaluación que determine la más adecuada, según nos criterios de calidad dados. Esta evaluación también se comenta.

Por último, se describe la forma para resolver el problema completo que se propone. Se busca una solución de cada parte de forma que el conjunto sea compatible. El orden en que se acometen los sub problemas acoplados influye en su resolución, por lo que el diagrama del proceso tiene gran importancia dentro de la metodología.

5.1.1 Descomposición del problema

Según esta propuesta, el diseño conceptual del proceso de montaje, en el contexto que se contempla y según las condiciones descritas, se puede subdividir en varios problemas. Esta definición del modelo del problema se ha realizado en parte gracias al trabajo de Más [1], sumándole otros aspectos que se consideran adecuados. Las soluciones a las distintas partes del problema se condicionan entre sí, se trata de problemas acoplados. La definición de las interacciones entre los problemas parciales, y el modo de hallar soluciones conjuntas son aportaciones de este trabajo.

Según la aportación de Más, el diseño conceptual de la industrialización se puede completar siguiendo el flujo de trabajo del diagrama de la Figura 9: principalmente generando sucesivamente las estructuras de las vistas As Planned y As Prepared del producto y definiendo las líneas de montaje. Esta idea se ha empleado como base y se ha ido desarrollando: se han incluido aspectos nuevos y se ha modificado la forma de abordar los que se planteaban en un principio.

La Figura 21 muestra de forma simplificada los pasos que conducen a la obtención de una solución factible del problema, y en su parte inferior una representación de las implicaciones de cada uno, sus resultados y las condiciones que impone sobre el resto. La secuencia final propuesta para aplicar la metodología no sigue exactamente los pasos de la figura como se describirá más adelante, sin embargo es útil para comprender los aspectos que componen el problema modelizado.

En la Figura 21 se observa que la resolución del problema requiere una etapa inicial en la que se definen los distintos procesos de fabricación que se ejecutarán durante el montaje. Este paso no se incluye de forma explícita en la metodología, de ahí el color distinto en la imagen, pero es imprescindible para su aplicación. El primer paso consiste en la definición de la estructura As Planned completa, con lo que se divide la carga industrial, repartiéndola en distintos nodos. Cada nodo ejecuta el ensamblaje del sub montaje del producto que tiene asignado, y dicho proceso se diseña en el siguiente paso, en el que se define la línea de montaje.

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

Figura 21: flujo para definir una solución, con la información generada en cada etapa.

La línea se diseña de forma progresiva, primero secuenciando las uniones entre componentes, con lo que genera una estructura As Prepared parcial y luego repartiendo las operaciones implicadas en estaciones y asignando recursos. La estructura As Prepared completa no se define en un solo paso, sino gradualmente para cada nodo industrial cuya línea se está diseñando. Una vez asignados los recursos necesarios, se diseña su distribución en el espacio físico de la planta.

Un paso fundamental del procedimiento es la definición de la red logística, según la cual se hacen llegar los componentes necesarios a las instalaciones adecuadas para su ensamblaje. Esta etapa incluye la selección de las instalaciones dónde se instalará cada línea, así como de los medios de transporte que se emplearán para comunicarlas. Se deberá tener en cuenta limitaciones impuestas por otras etapas, como por ejemplo el peso de los componentes a transportar, que viene fijado al definir la estructura As Planned, o la superficie y altura mínimas que deben tener las plantas industriales seleccionadas para instalar las líneas de montaje diseñadas.

De la forma en que se ha presentado el procedimiento, la definición de la red logística es la última etapa, por lo que está más limitada, pero si se plantea de otra forma las restricciones se impondrían en el otro sentido. Por ejemplo, si se seleccionan primero las plantas industriales, al diseñar cada línea de montaje se deberá respetar la superficie disponible en la misma.

A continuación se explicará cada parte del problema por separado, se comentará la manera propuesta para su resolución y las implicaciones que supone para la solución conjunta

5.1.1.1 Definición de procesos

Una primera tarea para el diseño conceptual del proceso de montaje consistiría en definir todos los procesos de fabricación que podrán estar involucrados [9][16]. Se requieren las operaciones básicas, con unos recursos necesarios, así como los componentes sobre los que se aplicarían.

La lista de procesos básicos de montaje forma parte del conocimiento o “Know-How” de cada empresa [14][16][22]. En la metodología que se propone, no se incluye la redacción de dicha lista, sino que se considera un trabajo previo, si bien resulta imprescindible. La información relativa a operaciones de montaje se considera parte de la información de partida, por lo que debe venir definida como parte de las condiciones iniciales industriales, que se describen en el apartado 5.1.2.

No sólo se requiere una relación de todos los procesos básicos de montaje, también es necesaria información que los relacione con los distintos productos que se desea ensamblar. Esta asociación puede realizarse a través de las uniones definidas para el modelo de producto considerado. Cada unión debe tener asignada una clase que determine el conjunto de operaciones de montaje necesarias para su ejecución [1]. La Tabla 2 muestra un ejemplo de tipo de unión, y las operaciones de montaje que involucra, así como los recursos requeridos. Todas las operaciones compuestas por varias operaciones simples también deben estar desglosadas. Así, a partir de unas uniones entre componentes se puede determinar los procesos de montaje necesarios.

Lo anteriormente expuesto deja de manifiesto la necesidad de incluir el conjunto de uniones involucradas en el montaje del modelo de producto que se considera. La definición de procesos también implica una recopilación de las uniones entre componentes que se desea ejecutar para completar el proceso de montaje. Cada unión tiene asociados dos componentes y pertenece a una clase definida. La generación de las uniones de un producto no se considera una parte explícita de la metodología, pero sí se ha implementado una manera de definir las interactivamente a partir del modelo CAD digital del producto.

	INVOLVED OPERATIONS	OPERATION TYPE	VARIANT
Joint Composite Components	Load and Position P1	Positioning at jig	Base component
	Load and Position P2	Positioning at jig	Added component
	Check interfaces and alignment	Testing	Structure alignment
	Positionate P2 into its final position	Nesting	
	Assemble	Mechanical joint execution	Composite-composite
	Check continuity with masses	Testing	Structural continuity
	Seal fuel tank	Sealing	
	Install systems in interfaces	Combined system installation	
	Connect installations	Combined system connexion	
	Install enclosures and/or closing devices	Addition of small components	
	Check functionalities	Functional tests	
	Apply sealer at junctions	Sealing	
	Retire from jigs	Positioning at jig	Added component

Tabla 2: operaciones y recursos para uniones de tipo "Composite Components".

Se debe tener en cuenta que una lista de procesos con sus recursos y productos asociados conformada a priori puede ser incompatible con determinadas configuraciones del reparto de la carga industrial. Por ejemplo si para una operación se debe levantar el componente y para ello hay asignado un utillaje con una capacidad determinada, si al distribuir la carga industrial esa operación se incluye en un momento en el que el componente ya se encuentra ensamblado a un submontaje de mucho mayor peso, es posible que el primer recurso previsto no tenga una capacidad suficiente. O bien puede que una tarea hija de una operación resulte innecesaria si existe una tarea equivalente que se ha programado con una fecha de inicio anterior. Las operaciones simples de cada proceso compuesto son únicamente una fuente de información inicial que posteriormente se irá modificando y completando.

La información relativa a procesos no está completamente definida por las razones comentadas. Los recursos necesarios para cada operación sólo están fijados en cuanto a su clase, mientras que el modelo concreto (que determina unas prestaciones y un precio) se asocia en fases más avanzadas de la metodología. De la misma forma, algunas actividades hijas de procesos compuestos no tienen una modalidad prefijada (por ejemplo ejecutarse de forma manual o automática).

5.1.1.2 Definición de la Línea de montaje

Definir la línea de montaje implica determinar toda la información acerca de los procesos que se deberán realizar para ensamblar cada sub montaje, incluyendo las estaciones que conformarán la línea, las operaciones a realizar en cada una y los recursos asignados. Este paso se debe realizar para cada uno de los nodos industriales fijados por la estructura As Planned del modelo de producto.

Se considera que esta tarea incluye la definición de diversos aspectos: esquema lógico de la línea, número de estaciones y tareas asignadas a cada una, entradas y salidas de componentes, precedencias, tecnologías básicas requeridas y recursos necesarios [15]. Concretamente, cada línea de montaje viene dada por un número de estaciones en las que un producto es objeto de un conjunto de operaciones mediante unos recursos asignados.

Para su ejecución completa se ha dividido a su vez en tres etapas sencillas: una secuenciación de las uniones involucradas en el nodo industrial, un reparto de las operaciones que ello implica en estaciones de la línea y una asignación de los recursos concretos a cada operación.

La secuenciación de la ejecución de las uniones involucradas determina la estructura As Prepared parcial del sub montaje correspondiente, y fija una primera secuencia de las operaciones a llevar a cabo. Dichas operaciones se deben ejecutar en un número de estaciones, que también debe ser definido. Cada estación puede incluir operaciones de varias uniones distintas. El tiempo de ciclo de todo el proceso, dado que se toma como hipótesis que se trata de una línea síncrona, coincidirá con el mayor tiempo de realización de todas las estaciones existentes.

Finalmente, se asignan recursos concretos a las operaciones determinadas, y se asigna una modalidad concreta a las actividades que estuvieran indefinidas. En este punto se conoce la configuración de los productos que pasan por cada estación, por lo que se dispone de información acerca de los requisitos de capacidad de los recursos. Además dado el estado de definición de la línea, también es factible evaluar los costes y tiempos, así como los cambios en los mismos al asignar un recurso u otro, o al escoger una modalidad u otra para una determinada operación. El apartado 7.4 detalla la definición de la parte de la metodología para el diseño de la línea de montaje.

La metodología no incluye un método automatizado de optimización de esta parte del problema porque se ha preferido un enfoque que priorice una ordenación decidida por el usuario con información de las implicaciones en los requisitos de espacio y recursos necesarios de la planta. Sí se incluye, sin embargo, un procedimiento automático, que se ejecutaría en la tercera fase, para seleccionar para un grupo de tareas el recurso más barato, más rápido o que tenga un valor equilibrado en ambos aspectos según un balance definido por el usuario. La subrutina repasa todas las tareas una por una y selecciona el mejor recurso según el criterio, teniendo en cuenta también los recursos compartidos. Sin embargo no se garantiza que la configuración obtenida sea la óptima según el criterio seleccionado.

En definitiva, el papel del usuario será, de forma interactiva, ordenar las uniones, distribuir las tareas en estaciones y realizar cambios en la secuencia que permitan su distribución reduciendo costes y con un aprovechamiento eficiente del espacio en planta, y finalmente asignar unos recursos concretos.

5.1.1.3 Distribución en planta

Según se plantea en la metodología, definir la distribución en planta implica emplazar todos los elementos asignados a cada planta industrial en un espacio con unas dimensiones limitadas de forma que la ejecución de las operaciones correspondientes sea factible. Para la realización de esta tarea es imprescindible la ejecución previa de la definición de la línea de montaje, puesto que de esa forma se determinan los elementos que se deberán distribuir en la planta.

Esta parte del problema no se suele tener en cuenta en los enfoques revisados en la literatura para la definición de líneas de montaje ni para la planificación de procesos [25]. Sin embargo posee gran importancia para determinar la factibilidad de una solución. Una configuración de una línea de montaje debe validarse demostrando que las estaciones definidas caben en el espacio disponible.

El desarrollo de esta sección de la solución se apoya en la capacidad de representación tridimensional de la herramienta PLM CATIA/DELMIA V5, que se usa como soporte sobre el cual se implementa la metodología.

En cuanto a los métodos desarrollados para asistir en esta etapa, se considera que CATIA dispone de un conjunto adecuado de funcionalidades para tal fin, por lo que no se ha desarrollado un conjunto de utilidades que den soporte concreto a la tarea. Sí se ha elaborado un número de procedimientos automáticos que faciliten y agilicen el uso de la herramienta CAD en esta etapa. Por ejemplo, se ha desarrollado una utilidad para seleccionar instantáneamente todos los elementos físicos de una estación (productos y recursos), para poder posicionarlos de forma conjunta y a partir de ahí posicionarlos unos respecto a otros. También se ha incluido una sub rutina para distribuir todas las estaciones en la planta según un patrón rectangular, y teniendo en cuenta la secuencia que siguen.

Esta etapa implica restricciones para la selección de plantas industriales, dado que éstas deberán tener una superficie disponible mínima. O bien la etapa estará limitada por unas restricciones de espacio dadas por las plantas, si estas son seleccionadas previamente. La forma en que se plantea que el usuario posicione los elementos implicados en la línea de montaje dentro del espacio digital de cada planta industrial se detalla en el apartado 7.5.

5.1.1.4 Definición de la cadena de suministro

Se plantea la cadena de suministro como el conjunto de plantas industriales en las que se ensamblarán los submontajes definidos en el producto y los medios que se emplearán para transportar estos productos intermedios entre ellas. Dado el amplio número de interpretaciones que el término engloba, y la diversidad de tareas que implica según otros enfoques de la literatura [54]-[58] en la metodología se ha denominado red logística a este aspecto de la producción. En el apartado 5.4 se explica de forma detallada el modelo de la red que se ha definido en la metodología.

La distribución logística tiene que satisfacer un número de restricciones provenientes de otras partes del problema, principalmente cada planta asignada debe tener un espacio disponible mayor que el requerido para la línea de montaje correspondiente. Además la frecuencia y el número de productos a transportar en cada trayecto se deben ajustar al tiempo de ciclo existente.

El tiempo de transporte de los submontajes hasta su nodo destino puede afectar al tiempo de entrega objetivo del producto, por ello debe cumplir con un mínimo especificado. En un caso extremo se requeriría varios vehículos para cada trayecto que partan a intervalos iguales al tiempo de ciclo buscado.

El conjunto de plantas industriales disponibles de la empresa y la información respecto a espacio y recursos disponibles para cada planta forma parte de las condiciones iniciales del problema. La información acerca de los medios de transporte disponibles para cada posible trayecto entre dos localizaciones y la capacidad de carga y dimensiones máximas para cada medio también vendrán definidos en ellas.

La ejecución de esta etapa de la metodología se realiza de forma automática. Se ha creado un procedimiento de optimización meta heurística según el método de Optimización de Colonia de Hormigas (ACO). A partir de la información inicial relativa a la logística, se determina de forma automática las localizaciones y medios de transporte más adecuados, o al menos suficientemente cercanos al óptimo, en términos de tiempos y costes. Este método se detalla en el apartado 6.1, en cuanto a su descripción, los motivos de su elección, su funcionamiento y su implementación.

5.1.2 Condiciones iniciales del problema

Se ha discutido previamente la necesidad de una información de partida para la aplicación de la metodología que se propone. Dicha información comprende diversos aspectos, en primer lugar, las operaciones de fabricación que podrán estar involucradas en el proceso de montaje.

Como se ha comentado, se requiere información acerca de las actividades simples y compuestas (es decir, con actividades hijas) del proceso, principalmente en cuanto a sus relaciones y a los recursos necesarios. Ello representa parte del conocimiento que emplea la metodología para la generación de soluciones conceptuales. La parte del conocimiento relativa a las actividades se plantea como una biblioteca de actividades simples y compuestas que incluya atributos como su orden dentro de una actividad padre, los tipos de recursos que requiere o las habilidades que se necesitan en caso de que se trata de trabajadores. En definitiva se trata de un modelo de clases de actividades, al cual se pueden añadir nuevos tipos.

Se plantea algo similar para los recursos, se han definido unos tipos genéricos de recursos, que son los que están asociados a las distintas clases de actividades; por ejemplo, una actividad de clase taladrado y variante automática necesita un recurso del tipo máquina CNC. La información también incluye modelos concretos de recursos, ya con unas prestaciones, por ejemplo una velocidad, un precio y una esperanza de vida; que pertenezcan a los distintos tipos genéricos. En el caso de los recursos humanos, la biblioteca incluye varias especializaciones, cada una con un conjunto de habilidades. Una actividad podrá requerir un operario que tenga una o varias de ellas, por lo que es posible que varias especialidades se ajusten al recurso requerido para una actividad. Los salarios de cada especialización, en horario convencional y fuera de él, también es una propiedad que se incluye en la biblioteca.

La información relativa a propiedades y relaciones de actividades y recursos se incluye en una misma biblioteca que se ha denominado diccionario PRD (Processes and Resources Dictionary), y que es un requisito explícito en la metodología. Este diccionario es una capa inferior del modelo de información de la metodología, descrito en el apartado 0, y que se describe a su vez en el apartado 5.3.1.

Además del diccionario PRD, se requiere información relativa a la red logística. Más concretamente, se incluirá la información del conjunto de plantas disponibles, con su localización, disponibilidad de espacio y medios de transporte disponibles de salida o llegada. También se necesita una matriz con las distancias entre cada par de localizaciones existentes, y según los tipos de medio de transporte (se recorre una distancia diferente al desplazarse por aire o por tierra entre dos puntos, por ejemplo).

Para la estimación de costes y tiempos, aunque se empleen los datos de los modelos de recursos (velocidad, coste), es necesaria una información de la que partir. Por ejemplo, para realizar una operación de remachado, si el recurso que controla la velocidad es un operario, se dispone de un valor de velocidad genérico, dado que el operario puede estar asignado a varias clases de tareas, y un número de elementos de la operación (en este caso remaches que hay que practicar). Si no se dispone de un tiempo estándar de ejecución de un remache, medido de forma empírica para ciertas condiciones y con una incertidumbre asociada, no se podrá inferir un valor de tiempo de manera mínimamente precisa. Por tanto, la información inicial debe incluir una lista de medidas empíricas para el tiempo de ejecución de actividades simples. A partir de dichos valores se extrapolará el tiempo requerido para cualquier operación del proceso, así como una incertidumbre que se propagará para la estimación de otras propiedades.

El modelo mismo del producto también se considera parte de las condiciones iniciales. Se debe partir de un modelo digital del producto que se desea industrializar, con todos sus componentes posicionados en los lugares correctos. Asociado a este modelo, debe incluirse además el conjunto de uniones entre componentes que se deben completar a lo largo del proceso de montaje. Cada unión tendrá asociado un tipo de actividad del diccionario PRD, de forma que se le pueda asociar un conjunto de operaciones, y unos recursos asignados a ellas. En este capítulo, en la sección 5.3, se explica con más detalle en qué consisten las condiciones iniciales, lo que representan para un caso específico y cómo afectan al diseño del montaje.

5.1.3 Características de las soluciones factibles buscadas

La metodología que se propone busca soluciones factibles para el diseño conceptual del proceso de montaje. En los apartados anteriores se ha descrito las partes que se considera que componen dicho problema. La factibilidad de una solución radica en que sea compatible con las restricciones que impone cada una de las partes.

Una solución vendrá definida por una distribución de toda la carga industrial en un número de nodos, que se representará con una estructura de producto llamada As Planned [5][9][17]; una asignación de cada nodo industrial a una planta disponible; un medio de transporte para cada movimiento del producto entre plantas necesario; una asignación de las tareas imputables a cada nodo a las estaciones definidas para él; una asignación de los recursos necesarios a las tareas y una distribución en planta de todo ello en cada una de las naves asignadas, respetando las limitaciones de espacio. Cada posible solución se evaluará de acuerdo con lo descrito en el siguiente apartado.

En el Capítulo 3 ya se hablaba del nivel de detalle de las soluciones buscadas. Se debe tener en cuenta que se trata de un diseño de la industrialización a nivel conceptual. Se considera que la metodología es adecuada para cubrir dicha etapa del ciclo de vida. Las posteriores tareas de diseño más detallado de los distintos procesos se pueden realizar partiendo de una primera definición conceptual que se obtenga tras aplicar la metodología propuesta. Se considera que uno de los puntos fuertes de los desarrollos que se plantea es la utilidad para clarificar qué vía de desarrollo es más adecuada para continuar definiendo el proceso de montaje, dado que dicha decisión se puede apoyar en unas evaluaciones, unos resultados y la comparación entre varias alternativas.

5.1.4 Evaluación de las alternativas

La aplicación se ha ideado para facilitar la definición de distintas alternativas, de forma que un amplio abanico de posibilidades pueda ser explorado.

Para comparar las distintas alternativas, la aplicación permite ejecutar una evaluación de las mismas en términos de coste, tiempo total de operación y requerimientos de transporte. Dichas evaluaciones se podrán ejecutar para alternativas en distintos grados de desarrollo. Además durante la generación de alternativas, se proporcionará al usuario información acerca del impacto de las decisiones que toma.

Asimismo se ha previsto la generación automática de alternativas para ciertos aspectos de las soluciones buscadas. Se efectuará cuando la aportación del usuario no sea alta. Además cada alternativa es verificada en diversos puntos para garantizar que cumple las restricciones. Finalmente se realiza una evaluación final de todas las soluciones halladas y se ordenan según una valoración multicriterio.

5.1.5 Resolución

En el presente apartado se ha detallado una descripción completa del modelo considerado para el problema del diseño conceptual del proceso de montaje. Se ha incluido una explicación de los sub problemas acoplados, con sus interacciones, así como de la forma de resolver cada parte por separado, aunque teniendo en cuenta las restricciones derivadas de las otras, las características de las soluciones factibles buscadas y la forma de evaluarlas. Tras todo ello, se estima necesario detallar la manera que se propone para acometer la resolución conjunta del problema completo.

Ya en el sub apartado 5.1.1 se discutía la relevancia del orden seguido para resolver las distintas partes del problema, y como ello podía hacer variar la forma en que se presentan las restricciones para cada una de las partes. Se considera que la secuencia seguida puede afectar a la calidad de las soluciones obtenidas, por lo que se ha definido, como parte de la metodología, una en concreto, que se considera la más adecuada dados los resultados obtenidos en pruebas y casos de estudio (ver 0 para más información).

Figura 22: secuencia propuesta para la resolución de las partes acopladas del modelo considerado para el diseño conceptual del proceso de montaje.

La Figura 22 muestra la secuencia que se propone para una adecuada resolución del problema considerado. En la figura se incluyen únicamente las principales etapas de la metodología: definición de la vista As Planned, de la red logística, de la distribución en planta y finalmente una evaluación que conduce a la obtención de unos resultados para cada solución factible obtenida y una ordenación de todas ellas según su calidad.

La secuencia propuesta parte de la definición de la estructura As Planned, que se considera la base para ejecutar el resto de etapas. Una vez completada, se observa que se pasa a una zona en la que se pueden completar las tres tareas mencionadas arriba de forma cíclica. Se trata de un procedimiento iterativo, dado que cada parte, como se ha descrito, impone restricciones sobre las demás. Este ciclo sigue siempre el mismo sentido: la distribución en planta siempre ha de ejecutarse después de la definición de la línea de montaje, dado que los elementos que se van a posicionar en esta última etapa vienen dados precisamente por la primera.

En cuanto a la red logística y la definición de la línea, se puede comenzar por una o por otra, de ambas formas se obtendrán resultados satisfactorios, si bien al ejecutar primero la optimización de la red logística, la determinación de unas localizaciones restringe en cierta medida la definición de la línea y su distribución en planta. De la otra forma se tiene más libertad para completar dichas etapas, aunque existe la posibilidad de que a la hora de realizar la optimización de la red logística no se halle ninguna solución factible (por ejemplo, si no existe ninguna planta con la disponibilidad de espacio necesaria, o las que existen no presentan ninguna alternativa de transporte con la capacidad para trasladar los productos correspondientes), por lo que habría que realizar cambios.

Se debe precisar que las etapas de definición de la línea de montaje y distribución en planta se ejecutan de forma independiente para cada nodo industrial, y no es necesario que se realicen para todos ellos con cada iteración. En aquéllos para los que sí se ejecute, se deberá seguir el orden descrito anteriormente.

Una vez cada etapa se ha completado al menos una vez, y para todos los nodos industriales en el caso de la definición y distribución de la línea, se considera que la solución obtenida es factible y puede ser evaluada. Sin embargo, se estima que una repetición de algunas de las tareas conduce a una mayor calidad de las soluciones obtenidas. Si, por ejemplo, se comienza con la red logística y, tras haber completado el resto de pasos respetando las restricciones, se repite, se realizará una nueva optimización, pero teniendo en cuenta también las nuevas características de la solución (por ejemplo conociendo el coste asociado a cada nodo industrial, así como el tiempo de ciclo del proceso) cuando antes únicamente se trabajaba con valores objetivo y estimaciones. De esa forma la optimización podrá realizarse de manera más ajustada, con lo que los resultados probablemente mejorarían.

5.2 Meta modelo PPR

La metodología desarrollada se apoya en un modelo de información que incluye una representación formal de los principales aspectos considerados para el diseño conceptual del proceso de montaje. Se trata de un modelo orientado a objetos cuyas clases representan aspectos de dicha fase de la industrialización en el caso general. Cualquier modelo de producto se debe poder procesar empleando dicho modelo, independientemente de su biblioteca de procesos y recursos.

Esta generalidad hace que la metodología sea válida para cualquier caso de modelo de producto. Sin embargo, también es necesario un modelo concreto para cada caso, que vendrá dado por la biblioteca de procesos y recursos, o diccionario PRD. En definitiva dicha biblioteca es otro modelo de clases, en el que se especifica las clases concretas de actividades que se consideran para el caso en cuestión, así como las clases de recursos, o de modelos de recursos. De ahí que se considere que el modelo de información es un meta modelo, y un diccionario PRD es una capa inferior del mismo. Por ejemplo, en el meta modelo existe la clase “Activity Type”, mientras que en un diccionario PRD existen clases de actividades como “Drilling” o “Positioning at jig” que, sin ser instancias concretas de actividades sí se pueden considerar instancias de la meta clase mencionada.

El meta modelo es una aportación de la presente tesis doctoral. Para su desarrollo se partió del trabajo previo de Más [1], y se dedicó un trabajo para su refinamiento con el objetivo de dotarle de una generalidad que permita desarrollar bajo él el modelo de cada caso concreto de industrialización.

El modelo también se ha ido modificando, adaptando y corrigiendo conforme se iban desarrollando modelos PRD concretos. Dichas modificaciones son necesarias, pues una condición necesaria para que un meta modelo sea válido y no pierda generalidad es que cualquier instancia de modelo que pertenezca al espacio que abarca, como el caso del diccionario PPR, se pueda desarrollar bajo su esquema. Un meta modelo no sería válido si, por ejemplo, un modelo desarrollado siguiéndolo requiriera un elemento o clase que no perteneciera a ninguna de las meta clases existentes.

Como era previsible, el primer diseño del meta modelo no podía dar soporte a todos los elementos que se iban requiriendo para desarrollar el diccionario PRD, por eso fue necesario un proceso de mejora continua hasta su versión actual, que es la que se presenta. Sin embargo, no se puede asegurar que la versión presentada sea perfecta, puesto que es posible que otra instancia de diccionario PRD requiera alguna meta clase aún no contemplada.

El meta modelo que se plantea abarca las áreas de la industrialización relativas a productos, procesos y recursos, de ahí la denominación PPR. Dichas secciones del modelo se describen a continuación, en los próximos sub apartados.

La Figura 23 muestra un diagrama en lenguaje UML del modelo de información PPR que se ha diseñado para dar soporte a la metodología que se propone.

Figura 23: estructura de clases del modelo de información PPR.

5.2.1 Sección de Productos

La parte dedicada a los productos del modelo de información busca representar los aspectos de la industrialización relativos a dicha área. Principalmente, se trata de los componentes y los sub montajes, que tienen repercusiones en los procesos industriales y logísticos. La sección incluye las clases SubAssembly y PhysicalProduct.

5.2.1.1 Clase SubAssembly

La clase modeliza los distintos grupos de componentes o sub montajes. Técnicamente únicamente representa un conjunto mixto de componentes y otros sub montajes, aunque tiene una gran importancia dentro del modelo debido a las relaciones de tipo “Padre-Hijo” que presenta consigo misma y con la clase PhysicalProduct. Mediante dichas relaciones se puede representar una estructura de producto completa, válida, por ejemplo, para almacenar vistas As Planned o As Prepared del producto.

La estructura de la vista As Planned puede estar almacenada, por tanto, en un objeto de la clase SubAssembly, que tenga asociados como hijos otros objetos, tanto de dicha clase, que a su vez podrán tener más hijos, como de la clase PhysicalProduct, que modeliza los componentes individuales. Una de las funciones destacadas de la clase es GetInvComponents(), que devuelve todos los componentes involucrados en el sub montaje, tanto hijos directos como otros presentes en la estructura.

5.2.1.2 Clase PhysicalProduct

Esta clase representa los componentes individuales del modelo de producto. Al igual que la clase SubAssembly, tiene gran importancia para la representación de estructuras de producto, y para el almacenamiento de información relativa a conceptos fundamentales de la metodología como las distintas vistas.

Además, la clase presenta diversas propiedades físicas que permiten el cálculo de propiedades fundamentales del sistema y la evaluación de restricciones. Un ejemplo de ello es el campo Mass, donde se almacena el peso de cada componente, que a su vez se puede calcular gracias a su propiedad Density. El cálculo del peso de un componente se realiza aprovechando una funcionalidad que provee la herramienta CATIA V5 para la determinación de propiedades físicas de modelos digitales, como su volumen o momentos de inercia, unido al valor de su densidad. Gracias a la determinación del peso de cada componente se puede evaluar el peso de un sub montaje, por ejemplo, para evaluar la factibilidad de su transporte mediante un medio dado.

5.2.2 Sección de Procesos

Las clases del modelo relacionadas con los procesos modelizan los distintos niveles jerárquicos de las actividades industriales que se definen con la aplicación de la metodología. El mayor nivel es el de la clase IndustrialNode, seguido por las clases Station y Joint, de niveles similares, y ActivityType y ActivityObject. Con dichas clases se busca representar, por un lado, elementos concretos relacionados con cada solución, como las operaciones, las estaciones o la línea misma; y también elementos que representan clases abstractas, como los distintos tipos de actividades.

5.2.2.1 Clase IndustrialNode

Se ha incluido en el modelo para representar los distintos centros entre los que se reparte la producción. La línea de montaje asociada a cada nodo se representa mediante un conjunto de objetos de clase Station, que estarán asociados al objeto IndustrialNode que represente a

dicho nodo. Además, los objetos de esta clase están asociados con el producto que se ensambla en ese centro, y que estará representado mediante un objeto de clase SubAssembly.

Los distintos objetos de la clase también estarán relacionados entre sí, de igual forma que los sub montajes de la estructura As Planned, y también mediante relaciones de tipo “Padre-Hijo”. Así, si según la vista As Planned un sub montaje A tiene dos sub montajes hijos B y C, existirá un nodo industrial “Montaje del producto A” que tendrá dos nodos hijos, “Montaje del producto B” y “Montaje del producto C2”, respectivamente. Los productos obtenidos de los procesos de los nodos industriales hijos serán las entradas del nodo padre, que a su vez tendrá un producto saliente. Todo ello es representable mediante el modelo descrito.

La clase IndustrialNode también sirve como elemento de conexión con la sección del modelo relativa a la distribución logística dado que, como se explica en el apartado 5.4, la red se compone de un conjunto de nodos de transporte, alguno de los cuales se corresponden con nodos industriales del proceso de montaje.

La clase también está relacionada con un número de objetos de tipo Joint, que representa las distintas uniones definidas para el modelo de producto. Cada nodo industrial, dados los sub montajes cuyo ensamblaje comprende, tiene asociadas una o más uniones, que se deberán ejecutar en la línea de montaje correspondiente.

Como propiedades destacadas de la clase IndustrialNode, se debe mencionar las relativas a atributos de cada solución o alternativa, obtenidos de la evaluación total o parcial de la misma. Por ejemplo, se incluye los campos CycleTime, TotalCost, U_Time, U_Cost y ReqSurface que almacenan valores calculados del tiempo de ciclo obtenido para ese nodo, su coste total, las incertidumbres de ambos valores o la superficie que ocupa la distribución en planta de la línea.

5.2.2.2 Clase Joint

Esta clase representa las uniones definidas para el modelo de producto considerado, y que se deben ejecutar para completar el proceso de montaje del mismo. Se engloban dentro de la sección de procesos porque representan un conjunto de operaciones de fabricación, aunque son intrínsecas de cada modelo de producto estudiado.

La clase está relacionada con dos objetos de clase PhysicalProduct que representan los componentes individuales que se ensamblan según la unión considerada. Cada unión está asociada a un tipo de actividad compuesta, que tendrá como hijos todos los procesos necesarios para ensamblar los dos elementos de la unión. En términos del modelo de información, la clase Joint tendrá asociado un objeto de clase ActivityType. De esa forma, a través de las uniones implicadas, es posible determinar los procesos a llevar a cabo dentro de un nodo industrial.

5.2.2.3 Clase Station

La clase modeliza las distintas estaciones que componen cada línea de montaje. No se considera un tipo de una actividad compuesta, sino una entidad diferente. Cada línea de montaje de una solución estará representada por un conjunto de objetos de clase Station, relacionados entre sí por unas relaciones de precedencia. Sin embargo, dichas relaciones no son seguidas de manera convencional en el proceso industrial, sino únicamente por cada unidad del producto al desplazarse aguas abajo en la línea de montaje. En el proceso real, dado que se asume que se trata de líneas síncronas, dentro de cada una se ejecutan de forma simultánea todas las estaciones, sólo que cada una tiene por objeto una unidad distinta del producto, cada una en un estado de montaje distinto.

Cada objeto Station tiene asociado un objeto ActivityObject, que representa el proceso industrial que se ejecuta en dicha estación. Los hijos de la actividad compuesta asociada serán todas las operaciones de montaje asignadas a la estación. La clase Station tiene propiedades similares las de la clase IndustrialNode, como el coste asociado o el tiempo que tarda en completarse.

5.2.2.4 Clase ActivityType

Los distintos tipos de actividades recogidos en el diccionario PRD de cada modelo de producto se representan en el modelo de información mediante la clase ActivityType. Se trata de una meta clase pura, dado que no representa ningún elemento concreto, sino otra clase de elemento. La inclusión de este tipo de clases garantiza que pueda existir un modelo de información único que pueda dar soporte a distintas clases de productos, cada uno con una librería de actividades distintas. También es posible la adición de nuevos tipos de actividades sin necesidad de variar el modelo de información general.

Cada objeto de esta clase está relacionado con un número de objetos de clase ResourceObject, que representan los recursos que se deben asignar a ese tipo de actividades. Además, si es un tipo de actividad compuesta, la clase estará relacionada con un número de objetos de clase ActivityObject, que representan las actividades hijas que tendrá ese tipo de actividad. Ni en este caso ni en el anterior con los recursos se asocian objetos de clase ActivityType o ResourceType, dado que conceptualmente, lo que un tipo de actividad tiene asociado son recursos y actividades hijas, no otras clases.

Por ejemplo, el tipo de actividad “Mechanical joint execution” se define como una actividad compuesta con varias actividades hijas, entre ellas “Drill to first diameter the witness holes” y “Drill to final diameter”. Lo que el tipo de actividad tiene asociado son objetos de clase actividad concretos. Independientemente, cada actividad hija tendrá asociado su propio tipo de actividad, en este caso ambas son del tipo “Drilling”. La Tabla 3 muestra algunos de los campos del tipo de actividad comentado.

TYPE	VARIANT	INVOLVED OPERATIONS	OPERATION TYPE
Mechanical joint execution	Metal-metal	Drill to first diameter the witness holes	Drilling
		Match holes mesh	Generic
		Drill to final diameter	Drilling
		...	

Tabla 3: fragmento de la definición del tipo de actividad “Mechanical joint execution”.

En cuanto a los objetos ResourceObject asignados al ActivityType, se les impone un valor para su propiedad Addititon, que en ocasiones puede diferir del que heredasen de su ResourceType. En cualquier caso, las actividades nunca impondrán valores de la propiedad relativos a que el recurso se comparta entre actividades, sino relativos a que se asigne más de un recurso de ese tipo a la propia actividad. En la sección 5.2.3.1, relativa a la clase ResourceObject, se explica con más detalle la propiedad Addition de los recursos y sus posibles valores.

En la metodología se ha incluido la existencia de tipos de actividades que presenten diversas variantes, o distintas posibilidades para las actividades de dicho tipo, principalmente en cuanto a recursos necesarios se refiere. En la práctica, a nivel del modelo de información, un mismo tipo con dos variantes se modeliza como dos objetos distintos, cada uno tendrá el mismo valor de su campo TypeOfActivity (el nombre del tipo), un valor distinto de su campo Variant y, lógicamente, distintas características.

5.2.2.5 Clase *ActivityObject*

Esta clase representa cada una de las operaciones concretas existentes en el proceso de montaje que se pretende definir. Cada objeto de la clase tendrá asociado un objeto de clase *ActivityType*, que represente su tipo y variante, un conjunto de objetos de clase *ActivityObject*, que representen a sus actividades hijas, en caso de ser compuesta, otro objeto de esta clase que represente su actividad padre y un número de objetos de clase *ResourceObject*, que representen los recursos que se deben asignar a la actividad.

Tanto las actividades hijas como los recursos necesarios se heredan del objeto *ActivityType* asociado. No se asocian directamente los relacionados con el objeto *ActivityType*, puesto que deben ser únicos para cada actividad, y de esa forma se compartirían entre todas las de ese tipo. En su lugar se realizan creaciones de nuevos objetos, copiándolos de los asignados al *ActivityType*. Algunos campos significativos de la clase tienen que ver con su posición dentro de su actividad padre, como la propiedad *Priority*, que determina su posición según las relaciones de precedencia, o si se puede separar de su actividad padre en la etapa de definición de las estaciones de la línea. Muchas de las propiedades asociadas a las actividades se modelizan mediante objetos de la clase *MfgAttribute*, en lugar de empleando los campos de la clase, como parte del modelo abierto que se propone. Los costes y tiempos de las actividades se incluyen mediante objetos de dicha clase.

5.2.2.6 Clase *MfgAttribute*

La inclusión de propiedades de elementos modelizados en el diccionario PRD se puede realizar mediante unos campos de la clase correspondiente del meta modelo (por ejemplo los campos *Name* o *Id* de la clase *ActivityObject*), o bien mediante objetos de la clase *MfgAttribute*. Mediante estos objetos se consigue representar, por tanto, propiedades de los elementos que intervienen en el sistema. La adición de nuevas propiedades es posible simplemente añadiéndolas al diccionario PRD.

Cada objeto *MfgAttribute* tiene diversos campos que facilitan su definición, como el *Value*, *Unity* o *Type*, para su nombre, unidades y tipo de propiedad. Este último campo recoge el tipo de dato en cuestión, siguiendo la nomenclatura habitual en la informática (datos de tipo *Real*, *Integer* o *String*). El campo *Value* siempre será un dato de tipo *String*, pero según el tipo del objeto, puede devolver un dato del tipo adecuado al ser llamado por una función..

Los objetos de esta clase están asociados tanto a actividades como a recursos, y tanto a instancias concretas como a tipos o modelos. En realidad no es una clase completamente de la sección de procesos, sino que se encuentra entre ella y la sección de recursos.

5.2.3 Sección de Recursos

Los recursos se representan en el modelo de forma similar a los procesos. Existe una meta clase que representa las distintas clases de recursos, de forma similar al caso anterior. Sin embargo, en este caso no basta con eso, puesto que, además de un tipo, cada recurso puede tener también un modelo concreto o, si se trata de recursos de tipo “*Worker*” o recursos humanos, una especialidad concreta. Por esa razón, en el área relativa a los recursos

5.2.3.1 Clase *ResourceObject*

Esta clase se ha definido para representar cualquier recurso existente. Se ha considerado recurso a un gran número de los elementos del sistema. Además de máquinas, herramientas, operarios y utillajes, también se considera que una planta industrial también lo es, al igual que un medio de transporte.

Al igual que los de la clase `ActivityObject`, los objetos de `ResourceObject` representan elementos existentes en la línea de montaje (en este caso recursos) y tendrán asociado un tipo, que estará representado por la clase `ResourceType`. Adicionalmente, para el caso de los recursos, también es necesario representar el modelo específico. Por ejemplo, para el caso de una grúa, el tipo de recurso será “Lifter”, pero además se tratará de un modelo concreto, como “SinCrane5X11”. Las prestaciones o atributos se obtienen del modelo.

La propiedad `Addition` de un objeto de esta clase determina el modo en que se comporta cuando más de un recurso del mismo tipo son asignados a una misma actividad; o bien si un mismo recurso puede ser asignado a más de una actividad. En un principio, los recursos heredan el valor de esta propiedad de la homónima del objeto `ResourceType` al que están asociado (es decir, su tipo). Sin embargo, una vez un recurso está asignado a una actividad simple, toma para esta propiedad el valor que el tipo de actividad impone a los recursos de ese tipo que se le asignen.

Por ejemplo, los recursos de tipo “Alignment meter” tienen por defecto un valor de `Addition` de “Linear in speed”, es decir, que si se asignan más recursos de ese tipo a la actividad, el tiempo necesario para su realización se verá reducido de forma proporcional. Si en un tipo de actividad se especificara que es necesario un recurso de tipo “Alignment meter”, y para ese recurso la actividad establece que su `Addition` vale “No” (multiplicar recursos no tiene efecto sobre el tiempo ni los requisitos de la actividad), ése será el valor de `Addition` efectivo para dicho recurso.

La propiedad `Addition` puede tener los siguientes valores:

- **“D/A”** (depends on activity), si no presenta ningún valor de por sí, y depende enteramente del tipo (`ActivityType`) de la actividad (`ActivityObject`) a la que se haya asignado.
- **“No”**, si la asignación de varios recursos no implica ningún cambio en la actividad a la que se hayan asignado, por lo que no es deseable, por representar costes innecesarios.
- **“Linear in speed”**, si la multiplicidad de todos los recursos con esta distinción asignados implica una disminución proporcional del tiempo en que se completará dicha tarea.
- **“Linear in capacity”**, si la multiplicidad de todos los recursos con esta distinción asignados implica un aumento proporcional de la capacidad de carga, en T_m , del conjunto.
- **“Not sharable”**, si un mismo recurso no puede ser compartido por tareas dentro de una misma estación, siempre que no se solapen en el tiempo.
- **“Sharable”**, si un mismo recurso puede ser compartido por tareas dentro de una misma estación, siempre que no se solapen en el tiempo.
- **“Sharable simultaneously”**, si un mismo recurso puede ser compartido por tareas dentro de una misma estación de manera simultánea. Es el caso de utillajes que puedan estar asignados a varias actividades dentro de una misma estación.
- **“Sharable between stations”**, si un mismo recurso puede estar asignado a tareas de distintas estaciones, es decir, se puede desplazar de una a otra.

Los valores relativos a que el recurso se comparta entre actividades o estaciones, únicamente se establecen desde objetos de clase `ResourceType`, mientras que el resto se pueden imponer según el tipo de la actividad a que esté asignado el recurso correspondiente. En la práctica, un recurso adquiere por defecto el valor de `Addition` que tenga su `ResourceType`; al asignarse a una actividad, adquiere el valor que imponga para dicho recurso el `ActivityType`, en caso de que lo haya, y en los momentos en que se deba determinar si el recurso se puede compartir, se comprueba el valor original en el `ResourceType`, pues no se modifica en ningún momento. Si no se especifica si se puede compartir o no en el tipo, el recurso se considera “Sharable”.

5.2.3.2 Clase *ResourceType*

Para representar los posibles tipos de recursos contemplados para cada caso de industrialización, se incluyó la clase *ResourceType*. Se trata de nuevo de una meta clase, cuyos objetos o instancias no son elementos existentes en el sistema, sino otras clases, en este caso de recursos, almacenadas en el diccionario PRD.

Cada objeto *ResourceObject* tiene asociado un *ResourceType*, que representará el tipo al que pertenece. El modelo se ha codificado de forma que para crear un nuevo objeto *ResourceObject* que sea compatible se debe recurrir a las funciones programadas para ello dentro del *ResourceType*.

La propiedad *Addition* de la clase gobierna el comportamiento de los recursos que sean de ese tipo, en los casos de que se vaya a compartir el recurso entre actividades o de que aún no haya sido asignado a una actividad. Un mismo *ResourceType* puede tener dos valores simultáneos de *Addition*, uno para casos en que se comparta y otro para la asignación de varias unidades a la misma actividad. En esos casos los valores se separan por el carácter “;”.

La propiedad *Assignment* determina el tipo de entidades de la estructura de procesos a las que se puede asignar un recurso de ese tipo. Esta propiedad puede valer “*Activity*”, si el recurso únicamente se puede asignar a actividades dentro de una estación; “*Station*”, si se puede asignar a una estación completa; “*Industrial node*”, si se asigna al nodo industrial completo, como por ejemplo el tipo *Industrial plant* o “*Model*”, si no es un recurso que se pueda asignar a la línea de montaje, sino que interviene en otros aspectos del modelo, como por ejemplo los medios de transporte de la red logística.

5.2.3.3 Clase *ResourceModel*

La clase *ResourceModel* representa los modelos concretos de recursos que se han considerado adecuados para cubrir los requisitos que imponen las actividades del sistema, aunque muchos de ellos puede que no se asignen. Cada modelo presenta unas características específicas, un precio y unas prestaciones (como capacidad de carga o esperanza de vida) que permiten el cálculo de diversos parámetros del sistema. Estos datos específicos vienen determinados en el diccionario PRD concreto, puesto que varían para cada instancia de modelo (no todos los modelos tienen una capacidad de carga, por ejemplo). La clase *MfgAttribute* soporta a dichos atributos dentro del meta modelo.

Cada objeto *ResourceModel* tiene asociado uno o varios objetos de clase *ResourceType*, dado que un modelo puede desempeñar funciones de distintos tipos de recursos. Sin embargo, cada recurso asignado a las actividades únicamente pertenece a un tipo, según la función que se requiera de él en dicha actividad. La manera en que un recurso puede o no desempeñar más de una función, cuando su modelo pertenezca a varios tipos, está regulada por la propiedad *Addition* del objeto *ResourceModel* correspondiente.

La propiedad *Addition* de la clase *ResourceModel* es distinta a la homónima de la clase *Resource*. En este caso se emplea para diferenciar si un recurso puede desempeñar varias funciones dentro de la misma operación. Por ejemplo, para una operación de levantamiento de componentes, se requieren 2 utillajes específicos y un elevador que desplace el componente de uno a otro. Sin embargo, si se dispone de un utillaje específico con la capacidad de elevarse, se cubrirían todas las necesidades de la operación con ese único recurso. El campo *Addition* de dicho recurso tendría el valor “*Multi*”. Muchos modelos pertenecen a varios tipos de recurso a la vez, pero no todos pueden desempeñar esas funciones de manera simultánea.

Otro campo destacado de la clase es CADPath, donde se almacena la ruta en el sistema de archivos del documento que contiene la representación digital de un recurso del modelo correspondiente. Al generar las líneas de montaje en el bloque B de la metodología, se deben cargar las representaciones tridimensionales de todos los recursos asignados. Para ello se generan nuevos documentos de tipo Product, uno por cada recurso individual. Sin embargo, para cada modelo, los nuevos productos siempre apuntarán al mismo archivo de geometría tridimensional.

5.2.3.4 Clase ResourceHRSpecialization

Esta clase es análoga a ResourceModel, pero representa las distintas especializaciones que tengan los posibles trabajadores asignados a las tareas de montaje. La propiedad Skills recoge las diferentes aptitudes que tiene cada especialidad. Distintas especialidades pueden tener una o varias aptitudes en común. Por ejemplo, las especialidades “Structure assembler” y “Automatic machines operator” tienen ambas entre sus habilidades “Metal structures assembler” y “Structures verifier”.

Cada actividad que requiera la asignación de un operario (o recurso del tipo “Worker”), tendrá una lista de aptitudes imprescindibles, en su campo ReqSkills. Cualquier recurso de tipo “Worker” cuyo objeto ResourceHRSpecialization incluya en su lista de Skills las habilidades requeridas se podrá asignar. Tanto en el campo ReqSkills de un objeto ActivityObject como en el campo Skills de la clase que se describe, las capacidades se concatenan en un único dato de tipo String, separándose unas de otras mediante el carácter “;”.

Otras características de cada especialidad, que ya vendrían incluidas en el diccionario PRD específico, serían el precio al que se paga una hora normal de cada trabajador, el precio de una hora en turno extraordinario y la velocidad media. Dichas características son las que se han contemplado al definir el diccionario PRD que se ha empleado en el diseño del sistema y para los casos de estudio, pero podrían variar en otros casos.

5.2.4 Sección de la cadena logística

Por último, el meta modelo incluye una sección con varias clases para objetos relacionados con la red logística. Además dichos objetos son fundamentales para soportar la definición automática de la red según los métodos descritos en la sección 6.1. Las clases de esta sección también están relacionadas con objetos de clases de otras, como recursos o nodos industriales, pues una determinada solución para la logística está relacionada con ese tipo de entidades. En la sección 5.4 se expone el modelo diseñado para la red logística de manera más detallada.

5.2.4.1 Clase TransportNode

La clase TransportNode representa un nodo dentro de la red de transportes, es decir, un lugar hasta donde llega, desde donde parte o ambas cosas un movimiento de componentes. La metodología soporta transportes con una escala intermedia. En esos casos, la parada no cuenta como un nodo de la red.

Los objetos de clase TransportNode de un caso de montaje determinado se conocen, en cuanto a su número, una vez se ha definido la estructura de la vista As Planned. Parte de estos objetos coincide con los nodos industriales definidos, y el resto son los denominados nodos Origen, y representan los lugares de los que parten los componentes individuales que serán ensamblados en el proceso.

Los objetos de esta clase están asociados entre sí mediante relaciones denominadas Destiny / Origin. Así, un nodo de la red tiene asociado otro nodo destino, hacia donde se transportará su producto saliente, y puede tener varios nodos origen, de donde partirían los componentes o submontajes que se ensamblarán en la línea correspondiente al nodo. El nodo correspondiente a la línea de montaje final sería una excepción, pues no tendría otro nodo destino. Por otro lado, los nodos denominados nodos Origen representan los lugares de los que parten los componentes individuales y no tienen asociado ningún otro nodo como origen.

Se debe distinguir entre nodos de tipo Origen, y los nodos asociados mediante la relación Origin a otro nodo. Estos últimos pueden ser o no de tipo Origen. Los nodos representados por objetos TransportNode pueden ser de dos tipos: Origen o Nodo Industrial. Este último si se corresponden con uno de ellos. El campo Nature tiene un valor u otro dependiendo del tipo de nodo. Por último, en caso de tratarse del tipo Nodo Industrial, el objeto estará asociado con otro de la clase IndustrialNode.

5.2.4.2 Clase ACO_Node

Los objetos de clase ACO_Node están relacionados con la manera de definir la red logística, en lugar de con ningún elemento de la misma. ACO son las siglas del tipo de método de optimización meta heurística definido para ello: Optimización de Colonia de Hormigas (Ant Colony Optimization).

Cada nodo de la red, representado por un objeto de clase TransportNode, tiene asociados dos objetos ACO_Node, mediante sus relaciones ACO_Node1 y ACO_Node2. El primero representará la decisión acerca de la localización de su planta industrial asociada. Todos los nodos de la red tienen asociada una planta con una localización, los de tipo Nodo Industrial y los de tipo Origen, si bien para estos últimos no se diseña su línea de montaje.

El segundo objeto ACO_Node representa la decisión acerca del transporte a efectuar. Cada transporte queda definido por el tipo de medio, el número de elementos que se transportan en cada viaje y la posible escala intermedia. El origen y el destino de cada trayecto ya vienen dados por las localizaciones de los nodos de la red correspondientes.

Los objetos de esta clase representan los puntos en los que se debe tomar una decisión para definir una solución a la red de distribución. Las decisiones concretas que se toman, y cuyas agrupaciones en secuencias determinan las soluciones específicas comprobadas, están representadas por los objetos de la clase ACO_Option. Así, un objeto ACO_Node dado tendrá asociados tantos objetos de clase ACO_Option como soluciones distintas se hayan comprobado, y cada una de estas soluciones vendrá dada por una secuencia de objetos ACO_Options, cada uno relacionado con su ACO_Node correspondiente.

5.2.4.3 Clase ACO_Option

Esta clase representa una opción concreta disponible para la decisión que se debe tomar por cada ACO_Node. En función de si se trata de elegir el transporte o la localización, se rellenarán unos campos u otros del objeto.

El campo Name sirve para identificar la decisión y la solución a la que pertenece, mientras que EasyId almacena parte de dicha información para que pueda ser mostrada de forma clara a un posible usuario, dos ejemplos del valor de dicho campo serían "Industrial node for assembly of Right Wing located at Bristol, UK" y "Transport of Right Wing from Bristol, UK to Albert, Fr by Ship and Truck stopping in Caen, Fr". El campo Order recoge el número que ocupa la opción dentro de la secuencia de decisiones que determina una solución.

Los campos `Transport_Cost`, `Transport_NElems`, `Transport_Freq`, `Transport_Freq2` y `Transport_Ut` representan valores de atributos calculados en caso de que la decisión corresponda con un transporte. `Transport_NElems` representa el número de elementos que se transportan con cada viaje y `Transport_Freq` la frecuencia de los trayectos en cada tiempo de ciclo, ambos valores son inversamente proporcionales. `Transport_Freq2` representa la frecuencia de la segunda parte del viaje cuando hay una escala. `PheromonAmount` recoge un valor relacionado con la puntuación obtenida por la opción dentro de la solución global.

Los objetos `ACO_Option`, en caso de corresponder a una decisión acerca de la localización de una planta, tienen asociada la planta industrial que se ha seleccionado para ellos, que está representada por un objeto `ResourceObject`. En caso de corresponder a una decisión acerca del transporte, tendrán asociada una actividad compuesta que represente el trayecto. Dicha actividad incluirá las operaciones de carga y descarga, y el medio de transporte asignado como recurso.

5.3 Modelos específicos: Condiciones Iniciales Industriales

En la sección 5.2 se ha descrito el modelo general diseñado para soportar la aplicación de la metodología para la definición conceptual del montaje de cualquier modelo de producto, si bien todos los desarrollos se enfocan más hacia el sector aeroespacial. En esta sección se detallará los modelos específicos de recursos y procesos que se deben emplear, así como la información de partida que se requiere para la definición de soluciones del proceso de montaje.

En primer lugar se describirá lo que en la metodología se ha denominado diccionario PRD, ilustrándolo con varios ejemplos. Se describirá a continuación la información requerida para la definición de la red de transportes entre nodos industriales, como localizaciones disponibles, medios de transporte, distancias o tiempos según cada medio. También se describirán las uniones.

5.3.1 Diccionario PRD

A continuación se definirá el concepto de PRD, desarrollado como parte de la metodología, y se detallará sus implicaciones en la definición de soluciones factibles para el diseño del proceso de montaje, así como las relaciones que guarda con el modelo general o meta modelo, descrito en la sección 5.2.

El acrónimo significa Diccionario de Procesos y Recursos (Processes and Resources Dictionary) y se trata de un conjunto de librerías que contienen la información necesaria para definir completamente el conjunto de procesos, incluyendo estaciones y operaciones simples o compuestas, con sus respectivos recursos asociados, requeridos para diseñar la línea de montaje completa (o líneas de montaje contempladas).

Para explicarlo de forma detallada, se ha creado un ejemplo de diccionario PRD simple, con un número reducido de actividades y recursos.

5.3.1.1 Un ejemplo sencillo de diccionario PRD

La Figura 24 muestra los objetos del meta modelo relacionados con procesos y recursos y, en la parte inferior, un ejemplo de PRD de un proceso trivial con unas actividades y recursos asociados; la correspondencia entre ambas partes se ha destacado con distintos colores. Se trata del proceso “Prepare Spaghetti Bolognese”, con la variante “Mixing before serving.”

Modelos

Figura 24: correspondencia entre la sección de procesos y recursos del meta modelo y un modelo específico definido como ejemplo.

Para señalar la correspondencia entre el meta modelo y el PRD, en la Figura 24 se ha empleado un código de color en el que elementos representados por objetos de clase ActivityObject (actividades concretas de un tipo dado) se han enmarcado en azul; los asociados a la clase ActivityType (tipos de actividades) en rosa; etc. El código completo queda establecido si se examina las clases mostradas en la zona superior. No todos los objetos de una clase se han remarcado en la zona inferior (por ejemplo todos los ActivityObject, en azul) por motivos de espacio.

Principalmente, un PRD debe contener la información que permita definir la estructura de procesos. Cada posible tipo de actividad debe estar incluido, junto con el tipo de recursos que requiera, y con los valores de las propiedades incluidas en el meta modelo (Addition o Priority, por ejemplo). Además, cada tipo de actividad definido podrá tener otras propiedades no contempladas explícitamente en el meta modelo, denominadas atributos. En el ejemplo de la Figura 24 se puede observar todo ello en las actividades simples en la parte central. Por cada tipo y/o variante específica el tipo de recursos requerido, así como un número de atributos y las Skills necesarias para los recursos de tipo Worker que se necesitan.

Las actividades compuestas, es decir, que incluyan la ejecución de un número de actividades hijas, deben definirse incluyendo los nombres y tipos de todas sus hijas. En esos casos, cada operación incluida tiene un nombre distinto a su tipo genérico, para identificar esa actividad en concreto dentro de la entidad padre. En el ejemplo desarrollado, la actividad principal, cocinar el plato, tiene 3 actividades hijas “Cook the spaghetti”, de tipo “Cook pasta”; “Cook the sauce”, de tipo “Cook Bolognesse sauce” y “Mix spaghetti and sauce”, de tipo “Mix ingredients”. Las dos primeras implican la ejecución de varias actividades hijas, por lo que también se incluyen en la parte de actividades compuestas, a la izquierda en la imagen.

Habitualmente, las actividades compuestas no tienen recursos directamente asignados, por lo que se ha omitido dichas columnas en las tablas mostradas en la figura. Además, no se han incluido su columna de atributos por motivos de espacio, puesto que únicamente se ha definido el tiempo en este modelo.

Sí que es de gran importancia el valor que se establece para el campo Priority de las actividades involucradas. Por ejemplo, para cocinar el plato, las actividades relativas a cocinar la pasta y cocinar la salsa pueden hacerse simultáneamente (siempre que haya suficientes recursos para las tareas a ejecutar en paralelo), dado que ambas tienen el mismo nivel de prioridad, 1. En cambio, las operaciones que componen la actividad de cocinar la pasta únicamente pueden ejecutarse de manera secuencial (hervir agua, cocinar la pasta y extraerla y escurrir), y así lo estipulan los valores de Priority, 1, 2 y 3, respectivamente.

Todas las actividades hijas (simples o no) incluidas en las compuestas deben estar completamente definidas en el diccionario, es decir, sus tipos y variantes deben estar incluidas en él. En la Figura 24, las actividades “Mix spaghetti and sauce”, “Heat water to boiling point”, “Extract the pasta and strain” y “Cook the onion” pertenecen a tipos y variantes que están definidos en el diccionario, en este caso son actividades simples de distintos tipos.

Las actividades que requieren la asignación directa de recursos deben especificar el comportamiento ante la adición de varias unidades de los mismos. En el caso del ejemplo, se puede observar que muchos de los recursos siguen la regla de “Linear in capacity”, es decir, que la capacidad conjunta se ve incrementada al ir añadiendo nuevas unidades del mismo tipo de recurso. Cuando una actividad tiene más de un tipo de recurso asignado que siga esta regla, para que se cumpla, todos tienen que verse incrementados, y se tendrá en cuenta el valor menor de todos los grupos de recursos que la sigan.

Por ejemplo, para las actividades de tipo “Boil liquid” y variante “Water”, hace falta un recurso de tipo “Pot” y un fogón, o recurso tipo “Fireplace”. Dado que ambos siguen la regla de Addition “Linear in Capacity”, si se asignase 2 recursos tipo Pot del modelo VAL2000St y otros dos fogones del modelo KFire Max, dado que la capacidad en ambos casos es de 10 l, se obtendría una capacidad total de 20 l. Si en lugar del modelo VAL2000St se asigna 2 unidades WokTFKIT, que también pertenece al tipo “Pot” pero tiene una capacidad de 6 l, junto con el mismo modelo de fogón, la capacidad conjunta será en este caso de 12 l.

En cuanto a los recursos humanos, en este diccionario se han definido 2 especialidades, “Amateur” y “Professional cook”. Como se puede observar, todas las actividades simples las puede ejecutar un trabajador de especialidad “Amateur”, excepto las de tipo “Strain”, pues requieren de la Skill “Pasta cooking”, que únicamente poseen los trabajadores de la especialidad “Professional cook”.

Conceptualmente, las actividades simples y compuestas son el mismo concepto, salvo que las segundas, o más bien sus tipos, están representadas en el meta modelo por objetos que tendrán asociados objetos de clase ActivityObject que representen sus operaciones hijas. En el diccionario PRD ocupan secciones diferentes debido a que la generación automática de los objetos informáticos al iniciar la aplicación se debe hacer de forma separada.

La creación de los objetos ActivityType, y de todos los relacionados con un PRD específico es compleja. Se requiere primero que se hayan creado todos los objetos ResourceType, pues los tipos de actividades tendrán asociados unos recursos que deberán pertenecer a tipos ya declarados (o creados, en este caso). Para poder crear los ActivityType representativos de actividades compuestas, se deben haber creado todos los representativos de actividades simples, dado que para definir una actividad compuesta, se deben especificar sus operaciones hijas, que habrán de pertenecer a tipos previamente creados. Además, los tipos de actividades compuestas que se incluyan como hijas de otras, se deberán crear antes.

En el ejemplo mostrado, el objeto ActivityType que representase al tipo principal, “Prepare Spaggetti Bolognesse”, no se podría crear en primer lugar. Previamente se deberían crear los objetos relativos a los tipos de sus actividades compuestas hijas, “Cook pasta” y “Cook Bolognesse sauce”. Y previamente a ello se deberían haber creado todos los objetos representativos de los tipos de actividades simples, lo cual habría debido de estar precedido por la creación de los objetos de los tipos de recursos definidos.

5.3.1.2 Diccionario PRD definido para los casos de estudio

Si bien el ejemplo de la sección 5.3.1.1 se considera apropiado para ilustrar la correspondencia entre el meta modelo y un PRD, es cierto que no se corresponde con procesos de un posible ejemplo de montaje industrial. Para el desarrollo de la metodología y su posterior implementación y puesta a prueba, se ha definido un PRD específico del montaje de una aeronave.

La composición de las actividades compuestas se ha definido a partir de las librerías de actividades básicas desarrolladas por Más [1]. A partir de ahí ha sido necesario definir los atributos que se emplearían en los distintos casos de montaje, principalmente coste, tiempo e incertidumbres de ambos valores. La Tabla 4 recoge la información que define dos actividades compuestas del PRD. Se pueden observar las propiedades provenientes del meta modelo, como la columna “P” (Priority) o “IS SEP.” (IsSeparable). Se ha incluido una de las actividades correspondientes a un tipo de unión porque es de los pocos tipos de actividades compuestas que tienen asignado de forma directa un recurso.

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

ID- TYPE- VAR.	INVOLVED OPERATIONS	IS SEP.	P	OPERATION TYPE	VARIANT	REQ. RES.	ATTRIBUTES		
							Name	Type	U.
JT2-Joint Fuselage-Wing Box - Standard	Load and Position P1	N	1	Positioning at jig	Base comp.	Specific base jig	Cost	Real	€
	Load and Position Wing Box, as WB	N	2	Positioning at jig	Added comp.		Uc	Real	€
	Check interfaces and alignment	N	3	Testing	Structure alignment		Time	Real	s
	Positionate Wing Box, as WB, into its final position	N	4	Nesting	-		Ut	Real	s
	Assemble	N	5	Mechanical joint execution	Metal-composite		Sub.	String	
	Check continuity with masses	Y	6	Testing	Structural continuity				
	Seal fuel tank	Y	7	Sealing	-				
	Install systems in interfaces	Y	7	Combined system installation	-				
	Install enclosures and/or closing devices	Y	7	Addition of small comp.s	-			-	
	Connect installations	Y	8	Combined system connexion	-				
	Check functionalities	Y	9	Functional tests	-				
	Apply sealer at junctions	Y	10	Sealing	-				
	Retire from jigs	Y	11	Positioning at jig	Added comp.				
MJ2- Mechanical joint execution - Metal-composite	Drill to 1st diameter the witness holes	N	1	Drilling	-		Cost	Real	€
	Match holes mesh	N	2	Generic	Manual		Uc	Real	€
	Drill to 1st diameter all the holes	N	3	Drilling	-		Time	Real	s
	Separate and clean	N	4	Generic	Manual		Ut	Real	s
	Apply sealer to surface	Y	5	Sealing	-		Sub.	String	
	Close and Cure	Y	6	Generic	Manual				
	Drill to final diameter 1st wave	Y	7	Drilling	-				
	Counterbore 1st wave	Y	8	Counterboring	-				
	Rivet 1st wave	Y	9	Riveting	-			-	
	Drill to final diameter 2nd wave	Y	10	Drilling	-				
	Counterbore 2nd wave	Y	11	Counterboring	-				
	Rivet 2nd wave	Y	12	Riveting	-				

Tabla 4: extracto de actividades compuestas del PRD definido para pruebas y casos de estudio.

La Tabla 5 muestra la definición en el PRD de dos actividades simples. Se puede observar que tanto el tipo de actividad “Positioning at jig” como “Drilling” presentan dos variantes “Base” o “Added component” y “Manual” o “Auto”, respectivamente. Sin embargo, cuando se definen las actividades compuestas de la Tabla 4, únicamente para el primer tipo se especifica la variante de la actividad (filas primera y segunda). Las veces que se cita el tipo “Drilling”, como actividades hijas de la actividad de Id MJ2, no se especifica que sea en su variante “Manual” o “Auto”.

Éste es un aspecto significativo de la metodología. Si bien es imprescindible definir las actividades compuestas especificando el tipo y algunas características de sus hijas, se permite que no se deje cerrado la variante. De esa forma, en las etapas en que se ofrece la posibilidad de realizar una evaluación del proceso de montaje, se puede elegir una de las variantes existentes de forma justificada, comparando resultados si se emplea una u otra.

Las actividades simples se han definido enteramente, partiendo de los tipos que era necesario crear para poder generar actividades compuestas basadas en los modelos de Más. A esas actividades se les añadió otros tipos y variantes adicionales. Se les ha dotado de algunos atributos además de los habituales (coste, tiempo, incertidumbres) según el tipo de actividad. Ejemplos de estos atributos son “Sub.” (Subject), un dato de tipo String donde se almacena el producto o componente sobre el que se realiza la operación. El atributo “Req. Cap.” tiene el valor de la capacidad de carga mínima que deben tener los recursos asignados a la actividad. Dicho valor se calcula a través del peso de los productos sobre los que se ejecuta la operación.

ID- VAR	REQUIRED RESOURCES TYPES		ADDITION	SKILLS	ATTRIBUTES			
					Name	Type	Unit	
Positioning at jig	PJ1- Base comp.	Lifter for big heights	Linear in capacity		Dist.	Real	m	
		Worker	No	Technician in sections movements	Cost	Real	€	
				Technician in stock	Uc	Real	€	
		-	-	-	Time	Real	s	
					Ut	Real	s	
					Sub.	String		
					Req. Cap.	Real		
	PJ2- Added comp.	Lifter	Linear in capacity		Distance	Real	m	
		Specific jig	No		Cost	Real	€	
		Worker	No	Technician in sections movements	Uc	Real	€	
				Technician in stock	Time	Real	s	
		-	-	-	Ut	Real	s	
					Sub.	String		
					Req. Cap.	Real		
Drilling	D1- Manual	Worker	Linear in speed	Machining Operator	Cost	Real	€	
		Driller	Linear in speed		Uc	Real	€	
					Time	Real	s	
					Ut	Real	s	
		-	-	-	N. el.s	Integer		
	D2- Auto	Automatic drilling machine		No	Cost	Real	€	
		Worker	No	Robotic operator	Uc	Real	€	
						Time	Real	s
						Ut	Real	s
		-	-	-	N. el.s	Integer		
					Sub.	String		

Tabla 5: extracto de actividades simples del PRD definido para pruebas y casos de estudio.

El atributo “N. el.s” almacena el número de elementos para los que se ejecuta el tipo de actividad simple cada vez que se lleva a cabo la operación. Es decir, si por ejemplo se trata de una actividad de tipo Taladrado, cuántos orificios se practicará al ejecutar esa operación concreta. La información relativa al número de elementos de las tareas que tengan dicho atributo viene dada por la unión a la que estén asociadas dichas actividades.

En la Tabla 5 se muestra también los recursos que requiere cada tipo de actividad simple. En el PRD se especifica en realidad los tipos de recursos requeridos, pero al iniciarse la aplicación, se generan objetos de la clase ResourceObject y se asignan como recursos (y no como tipos) al tipo de actividad correspondiente.

Los tipos de actividades que representan los transportes son un caso distinto porque, además del tipo de recurso requerido, se especifica el modelo concreto. Ello se debe a que cada variante tiene asignado un vehículo específico. Se explica con más detalle en la sección 5.4.2.2.

Para los recursos requeridos de tipo “Worker”, se observa que se especifica asimismo las Skills que se requerirán para la actividad correspondiente. Para el resto de recursos se especifica su comportamiento si se asignan más unidades del mismo tipo en la propiedad Addition, que en la tabla toma los valores “Lineal in capacity”, “Lineal in speed” y “No”. El orden en el que aparecen los recursos requeridos en el diccionario PRD no es arbitrario. Se considera que el recurso que determinará el tiempo de ejecución de la actividad será el primero que aparezca. Por ejemplo, para la actividad de tipo “Drilling” y variante “Manual”, el tiempo de realización vendrá dado por la velocidad del trabajador asociado, mientras que para la variante “Auto”, quedará determinado por la velocidad de otro recurso, de tipo “Automatic Drilling machine”.

ASSIGN. ADDITION			ATTRIBUTES		
			Name	Type	Unit
Specific base jig	Station	Sharable simult.	Capacity	Real	Tm
			Cost rate	Real	€/s
			Name	String	
			IsUnique	Bool.	
Specific jig	Activity	Sharable	Model	String	
			Capacity	Real	Tm
			Cost rate	Real	€/s
			Name	String	
Worker	Activity	D/A	Model	String	
			Skills()	Enum.	
			Speciality	String	
			Mean speed	Real	
			Learning curve type	Enum.	
			Speciality	Enum.	
Driller	Activity	L. in speed	Cost rate	Real	€/s
			Name	String	
			Mean speed	Real	m/s
			Cut mean speed	Real	mm/s
			Cost rate	Real	
			Name	String	
Auto drilling machine	Activity	No	Model	String	
			Mean speed	Real	m/s
			Cost rate	Real	
			Name	String	

Tabla 6: extracto de tipos de recursos del PRD definido para pruebas y casos de estudio.

La Tabla 6 muestra 5 tipos de recursos, que en el sistema estarán representados por objetos de la clase Resource Type. Se trata de parte de los tipos de recursos requeridos por los tipos de actividad descritos anteriormente. Como se puede observar, los tipos de recursos presentan algunas propiedades procedentes del modelo superior, como “Assign.” (abreviatura de Assignment) y “Addition” que, como se ha comentado, regulan, respectivamente, el tipo de entidades de la estructura de procesos a las que se pueden asignar y las implicaciones tanto de compartirlos como de asignar más de una unidad a una tarea.

Por ejemplo, las unidades de recursos de tipo utillaje básico (“Specific base jig”) se pueden asignar a varias operaciones de la misma estación aunque se solapen en el tiempo, dado que es la estructura sobre la que descansa un producto. Además su propiedad Assignment establece que se le puede asignar a operaciones de hasta nivel “Station”. En los casos prácticos llevados a cabo únicamente se ha asignado este tipo de recursos a estaciones enteras, y no a tareas concretas dentro de las mismas, por lo que no ha sido necesario explotar su propiedad de Assignment. En el caso de recursos de tipo “Worker”, se podrá asignar múltiples unidades a una operación dependiendo de cada caso concreto, de ahí su valor “D/A”. Para los de tipo “Driller” se establece que su adición incrementa la velocidad del conjunto linealmente, mientras que para los de tipo “Automatic drilling machine” se excluye dicha posibilidad. Ambas características, no obstante, pueden cambiar en el caso de que el tipo de la actividad concreta a la que se hayan asignado así lo establezca.

Los tipos de recursos incluyen, además, atributos específicos de cada uno. Muchos de ellos sirven para el cálculo de otros parámetros del proceso, como “Capacity”, “Cost rate” o “Mean speed”. El atributo “Learning curve type” del tipo “Worker” se definió para incluir la posibilidad de varios modelos distintos de aprendizaje de los trabajadores. Dicha posibilidad no ha sido explotada en la implementación de la metodología, pues la aplicación desarrollada únicamente incorpora un modelo, con una única curva de aprendizaje posible (aunque con variaciones paramétricas).

Modelos

		TYPE(s)	ADDI- TION	Name	ATTRIBUTES Value	Type	Unit	CAD FILE
BOBCm15000	Transporter jig; Lifter; Lifter for big heights	Multi		Name	Bauer Overhead bridge crane medium size	String		C:\...
				Capacity	15	Real	Tm	
				Mean speed	2	Real	m/s	
				Cost	31000	Real	€	
				Life expect.	1300	Integer	days	
				U. in LE	198	Integer	days	
D1	Driller			Name	D1 Drilling tool	String		C:\...
				Capacity	240	Real	HB	
				Mean speed	0,5	Real	elems./s	
				Cost	260	Real	€	
				Life expect.	2700	Integer	days	
				U. in LE	100	Integer	days	
ADM1	Automatic drilling machine			Name	ADM1 Auto Driller	String		C:\...
				Capacity	240	Real	HB	
				Mean speed	2,5	Real	elems./s	
				Cost	1750	Real	€	
				Life expect.	1600	Integer	days	
				U. in LE	55	Integer	days	

Tabla 7: extracto de modelos de recursos del PRD definido para pruebas y casos de estudio.

		SKILLS		ATTRIBUTES		
		Name	Value	Type	Unit	
Technician in logistics	Technician in transport logistics	Wage	14	Real	€/h	
	Technician in sections movements	Extra hours wage	20	Real	€/h	
	Technician in stock	Mean speed	1	Real	1/s	
Structure assembler	Composite structure assembler	Wage	14	Real	€/h	
	Metal structure assembler	Extra hours wage	20	Real	€/h	
	Machining Operator	Mean speed	1	Real	1/s	
	Robotic operator					
Automatic machines operator	Structures verifier					
	Metal structure assembler	Wage	12	Real	€/h	
	Robotic operator	Extra hours wage	20	Real	€/h	
	Structures verifier	Mean speed	0	Real	1/s	

Tabla 8: extracto de especialidades del PRD definido para pruebas y casos de estudio.

Los tipos de recursos distintos a “Worker” incluyen el atributo “Model”, en el que se especifica el modelo concreto de cada recurso de ese tipo. Aunque la asociación recurso-modelo ya está cubierta mediante un enlace entre ambas clases en el meta modelo, se incluyó el atributo para que dicha información se pudiera almacenar en los elementos del entorno de CATIA V5 creados. Así, al generarse mediante la aplicación desarrollada la representación digital de la línea de montaje, en las entidades CAD de los recursos, se incluye automáticamente el modelo específico como propiedad. Esto es necesario, dado que un mismo modelo geométrico digital puede representar a varios modelos de recursos. Para los recursos de tipo “Worker” sucede lo mismo, por lo que se incluye el atributo “Speciality”.

La Tabla 7 muestra 3 modelos específicos de recursos no humanos. En el caso del primero, como se puede observar, tiene varios posibles tipos. En este caso, podrá actuar como varios recursos, de los tipos que incluye, en cada actividad a la que esté asignado, dado que su propiedad Addition es “Multi”. Es decir, si una actividad requiere un recurso de tipo “Transporter jig” y otro de tipo “Lifter for big heights”, al asignar una unidad del modelo “BOBCm15000” se satisfarán ambas necesidades. En la tabla se muestran también atributos específicos, para los que ya se incluyen valores concretos, a modo de especificaciones de cada modelo. El atributo “Name” contiene una designación en lenguaje natural del modelo, para poder mostrarlo al usuario si fuese necesario.

La Tabla 8 es análoga, recoge las características de las distintas especialidades de recursos humanos. Para cada una se incluyen las aptitudes que posee, y atributos específicos, como su sueldo en turno normal y extraordinario o su velocidad. La velocidad para los recursos humanos se ha definido como un coeficiente, para el que el valor 1 representa la velocidad para la que se ha obtenido los tiempos incluidos en la información empírica de las distintas actividades. Nótese que una especialidad dada posee el atributo “Wage”, pero el tipo de recurso “Worker” posee un “Cost rate”, dado que se considera el coste horario de un recurso más. En el Capítulo 13 se incluye el PRD completo definido para la ejecución de casos prácticos.

5.3.2 Información logística

Si bien la información de procesos y recursos de un PRD es necesaria para la definición de las líneas de montaje implicadas en la producción, la información logística es imprescindible para la generación de soluciones factibles de la cadena o red logística. Más adelante se describirá detalladamente cómo una red logística viene definida por las localizaciones de sus nodos y los medios que se emplearán para cubrir el transporte de productos intermedios entre ellas.

Por tanto, para la generación de soluciones factibles de este aspecto de la industrialización, y la búsqueda del óptimo, será necesario disponer de información relativa a distancias entre las posibles ubicaciones, así como características concretas de cada medio disponible. Para la primera parte, se ha definido un tipo de tabla en la que se recoge la distancia, o de manera análoga el tiempo, que separa las distintas ubicaciones posibles. Se podría pensar que para dichos valores se podrían a extrapolar a los distintos medios de transporte, teniendo en cuenta la velocidad media de cada uno. Sin embargo, si se tiene en cuenta que, según el tipo de medio, la ruta entre dos puntos tendrá un trazado u otro (o directamente no será factible), se puede concluir que se requerirá una tabla distinta para cada tipo.

	Sevilla, Spain	Puerto Real, Spain	Castellon, Spain	...	Toulouse, France	Saint-Nazaire, France	Nantes, France	Marseille, France	Caen, France	Bremen, Germany	Nordenham, Germany	Laupheim, Germany	Bristol, UK	Brighton, UK	Portsmouth, UK
Getafe, S	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Sevilla, S		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Puerto Real, S			887		X	1957	2021	1742	2265	X	4961	X	2823	3148	3086
Castellon, S					X	2827	2891	865	3124	X	5821	X	3688	3997	3936
...					...										
Toulouse, F						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Saint-Nazaire, F							64	3688	842	X	3875	X	759	981	898
Nantes, F								3742	906	X	3939	X	804	1027	961
Marseille, F									3992	X	6692	X	4572	4893	4825
Caen, F										X	1130	X	485	606	553
Bremen, G											76	X	2028	1352	1402
Nordenham, G												X	1952	1274	1327
Laupheim, G													X	X	X
Bristol, UK														411	461
Brighton, UK															53

Tabla 9: información logística acerca de las comunicaciones marítimas entre localizaciones.

La Tabla 9, por ejemplo, muestra la información relativa a las distancias entre las ubicaciones definidas para la ejecución de los casos prácticos estudiados, para los medios de transporte marítimos. El tiempo requerido por medios del mismo tipo con distintas velocidades sí se considera que se puede determinar de manera proporcional usando la velocidad media de cada uno. Se puede observar que el tránsito entre determinadas localizaciones no presenta ninguna distancia, sino el símbolo “X”, ello indica que el transporte entre dichos puntos según ese tipo de medio no es factible. En el caso mostrado, al tratarse de transporte de tipo marítimo, sólo se considera posible los trayectos entre localizaciones que se encuentren en la costa o en la ribera de ríos navegables, y que cuenten con instalaciones portuarias.

La información logística generada para los casos prácticos estudiados incluye 3 tablas distintas, con la información de los trayectos entre las 21 localizaciones industriales posibles definidas. Las tablas representan, respectivamente, las distancia entre las mismas empleando medios marítimos y los tiempos de transporte requeridos si se utilizan medios terrestres y medios aéreos. Para los dos últimos se especifica en cada caso la velocidad media con la que se consiguen los valores tabulados. Además de la velocidad media, también se especifica la incertidumbre asociada a cada tipo de medio.

La segunda parte de la información logística incluye las características de los distintos medios de transporte posibles para cada caso concreto. Dicha información no se recoge en ninguna sección separada sino que está incluida en el PRD. Ello se debe a que los distintos medios de transporte se consideran en la metodología tipos de recurso, al igual que los transportes de componentes entre plantas industriales se consideran actividades. Así, los atributos de cada transporte (tiempo, coste, incertidumbres y frecuencia) se calculan según características de los recursos asignados, como la velocidad media, el coste de su combustible o su consumo, y según la distancia a recorrer.

Además, también se requiere información de cada planta industrial disponible. Por ejemplo, se debe conocer la superficie útil disponible y su altura máxima permitida. Esos datos también están incluidos en el PRD, pues las plantas se consideran también modelos del tipo de recurso “Industrial plant”.

5.3.3 Uniones del producto

Las uniones son una parte clave dentro de la metodología, dado que relacionan los distintos componentes del producto con los procesos necesarios para su ensamblaje. Cualquier producto dado deberá tener definido un número suficiente de uniones. Según el tipo de cada una, se puede determinar las operaciones de montaje que implica, gracias al diccionario PRD. Por esta razón es imprescindible que se incluya como información inicial todo lo relativo a las uniones del producto que se estudia.

5.3.3.1 Información requerida

Para cada unión se necesita saber, en primer lugar, los componentes del producto que relaciona. La metodología se ha modelizado de forma que una unión sólo relaciona dos componentes. La ejecución de ensamblajes entre un número mayor de piezas o sub montajes está soportada por la posibilidad de ejecutar varias uniones de manera simultánea en la misma estación de una línea de montaje. Inicialmente, la unión sólo contiene la identificación de los dos componentes individuales que se ensamblarán. En el proceso final diseñado, posiblemente la unión se haya ubicado en una posición dentro del mismo en la que los dos componentes ya se encuentren ensamblados a diferentes sub montajes, pero eso se determinará más adelante en la ejecución de la metodología.

También se debe conocer el tipo de cada unión. Las uniones deben estar definidas, a nivel de procesos, en el diccionario PRD. Es decir, los distintos tipos de unión presentes en el modelo del producto deben estar presentes en el PRD como actividades compuestas, y debe estar especificada su composición de actividades hijas, así como sus atributos y propiedades y recursos requeridos. Todo ello será necesario para generar la estructura de procesos de las líneas de montaje en las que se completen las distintas uniones.

También se debe incluir específicamente el número de elementos de cada unión. Sea del tipo que sea, se considera que una unión se completa mediante la creación de un número de elementos de unión entre los dos componentes. Por ejemplo el número de remaches, con lo que las operaciones requeridas para un único remache (taladrado a diámetros inicial y final, remachado y pulido superficial) se deberán repetir según el número de elementos que venga dado para la unión concreta.

5.3.3.2 Implementación

Toda la información mencionada anteriormente se podría incluir en el sistema mediante tablas, con el nombre de cada una, la identificación de sus componentes, etc. Sin embargo, se ha implementado de otra manera, todas las uniones de un modelo de producto deben estar incluidas dentro de un documento CATProcess como operaciones, y los productos asociados a cada operación serán instancias de los componentes de la unión. El tipo de unión y su número de elementos estarán incluidos como propiedades de la actividad. La metodología incluye un asistente para la definición de las uniones de un producto según el formato descrito. Esta funcionalidad se describe en la sección 7.2.

La Figura 25 muestra un ejemplo de la forma de implementar las uniones de un producto. Se muestra la unión número 11 del producto utilizado para la ejecución del segundo caso de estudio. En el caso de la figura, se trata del tipo de unión “Fuselage-Wing Box”, implica 27 elementos de unión y se realiza entre los componentes Fuselaje de cola trasero superior (RFBU) y Estabilizador vertical medio (VSM)

Esta forma de incluir la información de las uniones en el sistema se ha mantenido de la implementación de los modelos propuestos por Más [9], que se completó mediante el desarrollo de un prototipo básico. Se ha optado por mantener la implementación de dicho prototipo para así demostrar la aplicabilidad de los modelos propuestos inicialmente a una metodología más compleja. El prototipo requería la inclusión de las uniones del producto según el formato descrito, y tenía predefinidos varios tipos de uniones con unas actividades hijas sencillas asociadas [17].

Figura 25: representación en el entorno CATIA V5 de la unión número 11 de las definidas para la ejecución de casos prácticos.

5.4 La cadena logística

La cadena logística tiene un alto impacto sobre el proceso de montaje en términos de coste y tiempos [53][54][56]-[58][63][64][75], lo que se acentúa en los casos en que la actividad de producción está repartida en diversas plantas separadas geográficamente. Por esa razón se le ha dotado de un peso importante dentro de la metodología desarrollada

En cuanto a terminología, al hablar de cadena logística se hace referencia a lo que en la literatura se denomina comúnmente cadena de suministro. Sin embargo, éste es un término muy amplio, y a menudo implica tareas alejadas del área de la industrialización del producto, como las ventas o la gestión de pedidos de clientes, tareas que se sitúan fuera del alcance de la metodología que se propone. En la metodología que se propone, se define como cadena o red logística a la parte de la cadena de suministro que está reflejada en el modelo que se describe a continuación.

En este apartado se incluye una descripción sencilla de la red de transporte, tal y como se entiende en la metodología. Así se busca facilitar una comprensión global del modelo definido para este aspecto del montaje. También se detallará dicho modelo, repasando todos sus elementos y su correspondencia con el meta modelo y los diccionarios PRD. Por último se describirá la manera de calcular los distintos parámetros de la red.

5.4.1 Descripción

La cadena logística se define, según la metodología que se propone, como la red de comunicaciones entre los distintos centros de producción y fabricación, para posibilitar el traslado de componentes hasta las instalaciones donde deben ser procesados. Una red totalmente definida incluye un conjunto de nodos que están comunicados entre sí por unas uniones que se han denominado transportes.

Figura 26: ejemplo de una solución para una estructura As Planned y un conjunto de localizaciones dados.

La Figura 26 muestra un ejemplo de red logística para un conjunto de 9 localizaciones y un producto de 7 componentes que se ensambla con un sub montaje intermedio (la sección de cola). Se ha empleado el modelo de avión simplificado mostrado ya previamente.

Cada nodo puede ser de tipo nodo industrial, si incluye un proceso de montaje entre componentes, o de tipo origen, si tan solo representa el lugar de origen de componentes individuales. En la Figura 26, los 2 nodos industriales se han ubicado en las localizaciones D e I, y los de tipo origen en A, B, D, H y de nuevo I. Tanto los nodos de un tipo como los del otro deben estar comunicados con el resto de la red mediante transportes. Cada nodo tiene asociado uno o varios nodos de entrada y un nodo de salida, y debe estar unido con todos ellos. La estructura de transportes entre los nodos viene dada por la estructura As Planned del producto, que representa una primera agrupación de los componentes según la forma en que serán ensamblados.

La cantidad de nodos y sus relaciones viene ya dado, pero la localización de cada nodo debe definirse, según las instalaciones disponibles. Ello representa un problema combinatorio sin soluciones evidentes, pues la elección de una planta como localización de un nodo tiene muchas implicaciones, debido a los costes asociados y a su distancia con las otras posibles localizaciones del resto de nodos.

El número de posibilidades para la localización de los nodos de la red es elevado incluso para productos con una estructura sencilla, como el que se muestra en la Figura 26. Para ese caso habría un total de 7^9 soluciones posibles, es decir, más de 40 millones. Este número se reduce en parte debido a restricciones, como se verá más adelante, pero se ve incrementado si se incluyen las distintas posibilidades de transporte entre localizaciones. En el 6.1.1.3 se detalla el cálculo del número de soluciones del problema de la definición de la red logística.

La Figura 26 deja patente la diferencia entre los nodos de la red y las localizaciones posibles de la misma. Para el caso mostrado, dada la estructura de ensamblaje del producto, siempre existirán 2 nodos industriales (donde se ensamblan la sección de cola y el avión completo) y 7 nodos de tipo origen. Sin embargo, el número de localizaciones empleadas puede variar, dado que varios nodos pueden estar ubicados en la misma. En la solución mostrada, se emplean 6 localizaciones.

Cada transporte enlaza dos nodos relacionados según el As Planned o estructura de montaje. Para poder determinar la forma en que se realizará el transporte real, los nodos de inicial y final del mismo deben tener asignada una localización. No todos los nodos pueden comunicarse empleando cualquier tipo de transporte. Por ejemplo, sólo aquéllos que se encuentren en la orilla del mar o en una ribera podrán comunicarse por medios marítimos. El modelo también incluye la posibilidad de un transporte que haga una escala en una localización intermedia y cambie de medio de transporte, o bien continúe en el mismo para así poder cubrir distancias superiores a su alcance. En la Figura 26, los nodos B y E se usan como escala para el transporte de ambos estabilizadores y ambas alas, respectivamente.

En la Figura 26 se muestran tanto las comunicaciones posibles entre localizaciones como los transportes finalmente seleccionados para la solución. En cada localización se muestra si dispone de aeropuerto o puerto marítimo, y se muestra los transportes por aire, mar y tierra con los colores verde, azul y marrón, respectivamente. Las comunicaciones posibles se muestran como línea discontinuas, lo que da una idea del número de soluciones posibles, incluso si se fijan unas localizaciones, más aún si se tiene en cuenta la posibilidad de un transporte que haga escala en una localización.

A continuación se detallará el modelo de la red logística, describiendo cada uno de los elementos que lo componen y sus relaciones, así como su correspondencia con los modelos del resto de aspectos de la metodología, las hipótesis que se adoptan, las restricciones que se han impuesto y las formas de calcular los distintos parámetros requeridos.

5.4.2 Elementos del problema

En esta sección se detalla la forma en que se ha modelizado la cadena logística, haciendo hincapié en los elementos involucrados. Se trata de una formalización de algunos conceptos descritos en el apartado 5.4.1. Dado que en este capítulo aún no se plantea la resolución del problema de la red logística, la formulación matemática del mismo se deja para más adelante.

Una modelización apropiada de esta parte del problema que se plantea ha sido imprescindible, primero para la comprensión de su dimensión matemática y luego para la elaboración de un método de resolución. A continuación se detallarán los elementos que componen el modelo propuesto para la red logística.

5.4.2.1 Nodos de la red

La red logística está formada por nodos comunicados entre sí. En cada nodo, según su tipo, se ensamblan componentes y se generan productos intermedios, o se producen los componentes individuales. Cada nodo tiene un nodo destino, al cual se dirigirá su producto saliente, y un número de nodos de entrada, de los que provienen los componentes a ensamblar.

El número de nodos, su tipo y las relaciones entre ellos viene dado por la estructura de montaje del producto, o vista As Planned. Por ejemplo, dadas las condiciones de la Figura 26, para cualquier solución, el nodo industrial en el que se ensambla la sección de cola siempre será el precedente inmediato del nodo en que se ensambla el avión, y tendrá como nodos de entrada los orígenes de los dos estabilizadores.

Cada nodo debe ser ubicado en una localización, e impone una serie de requisitos para la selección de la misma. Los procesos de fabricación que implica cada nodo correspondiente requerirán una superficie, por lo que la planta que se seleccione tendrá impuesta la condición una superficie disponible mínima.

Además de la superficie, cada planta seleccionada debe tener una altura mínima, especialmente cuando se manipulan productos que pueden tener alturas del orden de una veintena de metros. La altura mínima requerida por un nodo industrial viene dada por el producto que se ensambla en su interior. Las dimensiones de éste serán las que impongan la altura mínima de la nave donde se ejecutará su proceso de montaje.

Tanto la altura como la superficie mínima son requisitos que sólo se pueden imponer a los nodos industriales, los nodos de tipo origen, por el contrario, son el resultado de procesos industriales que quedan fuera del alcance de la metodología, enfocada al montaje del producto. Por ello las restricciones acerca de su localización no se obtienen de un análisis de características, sino que vienen impuestas como condición inicial. Para ciertas localizaciones se especifica como atributo que pueden alojar el nodo origen de algunos componentes específicos, y se asume que con ello cumplen cualquier posible requisito.

Los nodos de la red, tanto de tipo origen como industrial, se representan mediante objetos de la clase `TransportNode` en el meta modelo. Como se muestra en la Figura 23, dicha clase está relacionada con las de actividades y recursos, que representan los transportes y los medios y plantas de la red.

5.4.2.2 Transportes

Se entiende como transporte a la necesidad de trasladar un producto intermedio entre dos puntos. Está asociado a la unión entre dos nodos enlazados en la estructura de montaje. Una vez generada la estructura e montaje del producto, ya existen los transportes que requerirá. Aunque no se hayan definido aún los vehículos que lo realizarán, o ni siquiera las localizaciones de origen y destino. Cada transporte tendrá varias opciones disponibles para su ejecución.

El conjunto de transportes requerido por la red logística, por tanto, viene en parte definido por la estructura As Planned. Concretamente el número de transportes necesarios, los nodos que comunica y el producto que transporta. Por ejemplo, volviendo a la Figura 26, independientemente de las localizaciones elegidas, siempre se requerirá el transporte de la sección de cola desde el nodo donde se fabrique hasta el nodo en que se ensamble el avión completo, y el producto a transportar será siempre, obviamente, dicha sección de cola.

Por tanto, cada transporte a realizar también impone unos requisitos a cualquier opción que se pretenda seleccionar. Uno de ellos restringe el peso del producto a transportar. Dicho valor debe ser inferior a la capacidad de carga del vehículo para que esa opción sea factible. Se contempla la posibilidad de transportar más de una unidad de un determinado producto, si la capacidad del vehículo lo permite.

Cada transporte también impone que la opción elegida esté disponible para las localizaciones de los nodos origen y destino. Esta condición viene impuesta una vez se eligen unas localizaciones para los nodos de la red.

Definir el transporte de la red requiere que los nodos de la misma deben estar ya localizados, razón por la cual las soluciones al problema se generan en dos etapas, como se describe en el apartado 0.

Los transportes se han incluido en el sistema como un tipo de actividad compuesta en el PRD. Dicho tipo se denomina “Complete transport” y puede pertenecer a las variantes “Air”, “Land” o “Sea”. Las actividades hija son simples y se corresponden con las operaciones de carga, descarga y el trayecto mismo. Para todas se requieren recursos, y para la última dicho recurso es el medio de transporte seleccionado. La Tabla 10 y la Tabla 11 muestran, respectivamente, el tipo de actividad compuesta que representa la operación completa de transporte de componentes por medios aéreos y las 2 variantes definidas para el tipo de actividad simple que representa sólo el transporte por vía aérea.

Id-TYPE- VAR.	INV. OP.s	P	TYPE	ATTRIBUTES		
				Name	Type	U.
CTp1-Complete Transport-Air	Load product	1	Connection operation	Cost	Real	€
	Transport	2	Air transport	Uc	Real	€
	Unload product	3	Connection operation	Time	Real	s
				Ut	Real	s
				Subj.	String	
				Orig.	String	
				Dest.	String	
				Freq.	Real	

Tabla 10: tipo de actividad relativa al transporte completo de componentes por vía aérea, en el PRD definido.

	Id- VAR.	REQ. RES.	MODEL	ATTRIBUTES		
				Name	Type	U.
Air transport	Tp1-Plane regular	Air transport mean	APC 08	Cost	Real	€
				Uc	Real	€
				Time	Real	s
				Ut	Real	s
				N.el.s	Integer	
				Subj.	String	
				Orig.	String	
				Dest.	String	
				Freq.	Real	
				R. Cap.	Real	kg
	Tp2-Beluga	Air transport mean	Beluga A300-600 ST	Cost	Real	€
				Uc	Real	€
				Time	Real	s
				Ut	Real	s
				N.el.s	Integer	
				Subj.	String	
				Orig.	String	
				Dest.	String	
				Freq.	Real	
				R. Cap.	Real	kg

Tabla 11: variantes del transporte simple por vía aérea.

Para la definición de los tipos de actividades simples que representan únicamente el transporte, se ha requerido un campo adicional, denominado “Model” (resaltado en la Tabla 11). En él se especifica el modelo concreto de recurso que se requiere, puesto que en esos casos no basta únicamente con definir el tipo de recurso: cada variante del tipo está directamente asociada a un vehículo. En el PRD definido para los casos prácticos, el transporte de variante Tp1 se llevará a cabo mediante el avión de carga APC 08, y el tipo Tp2 mediante el avión Beluga A300 600 ST, como se muestra en la Tabla 11. Para el resto de actividades simples del PRD este campo queda vacío, por lo que en el presente documento no se ha incluido en los extractos mostrados, por motivos de espacio principalmente.

5.4.2.3 Plantas

Las plantas son las instalaciones industriales donde se llevan a cabo los procesos de montaje. Cada línea de montaje del proceso debe estar emplazada en una de las plantas disponibles. Por tanto, a cada planta llegará un número de componentes o sub montajes entrantes, éstos serán ensamblados en su interior y ello producirá un producto saliente, que deberá ser transportado hasta la siguiente planta. Las plantas se encuentran, por tanto, en los nodos de la red de transportes, por lo que su localización influirá directamente sobre las rutas de transporte que se seguirán.

Se permite que varios nodos industriales (o líneas de montaje) se asignen a una misma planta industrial, siempre que se cumplan las restricciones de espacio y altura mínima. De esa forma se podría evitar algunos transportes, si, por ejemplo, dos nodos consecutivos se emplazan en las mismas instalaciones.

Las plantas se incluyen en el sistema como un tipo de recurso más, que se ha denominado “Industrial plant”, con unos atributos y propiedades. El valor de su propiedad Assignment hace que el sistema no reconozca las plantas como recursos que se pueden asignar a algún proceso de la línea de montaje, sino únicamente a los nodos industriales. Cada planta específica se define también dentro del PRD, en forma de un modelo de recursos de tipo “Industrial plant”. La Tabla 12 y la Tabla 13 muestran el tipo de recurso “Industrial plant” y un modelo concreto del mismo, denominado “IU1”, que tendría su ubicación en la localidad de Getafe.

Entre los atributos que se asocian a una planta industrial concreta, se puede encontrar el coste de utilización, que supone un precio por la utilización del total de la superficie por unidad de tiempo. Dicho precio debe comprender los costes de la planta imputables al proyecto.

El atributo “Useful surface” recoge el valor de la superficie de que dispone la planta. Es un atributo que pertenece al tipo de recurso y cuyo valor se proporciona al definir cada modelo concreto. Por ello aparece en las dos tablas citadas. El atributo “Available surface”, en cambio, recoge el valor de la superficie disponible de forma actualizada. Al ir asignando líneas de montaje a una planta, al valor de su superficie disponible se le va restando la superficie requerida por cada línea. Este atributo está asociado a cada instancia de recurso, planta en este caso, por lo que no aparece en las distintas plantas industriales concretas definidas, como la que aparece en la Tabla 13. Ello se debe a que formalmente se han definido como modelos de recursos, mientras que este atributo debe estar asociado a un recurso (clase ResourceObject).

La ubicación de cada planta se incluye en el atributo de tipo String “Location”. Las localizaciones de todas las plantas incluidas como modelo deben estar contenidas en las tablas de tiempos y distancias incluidas en las condiciones iniciales. Según la localización, también se especifica un nivel de salarios. Dicho valor se ha cuantificado mediante el valor del salario mensual mínimo de cada país. Para el cálculo, en etapas posteriores, del coste horario de un trabajador, se extrapola proporcionalmente, teniendo en cuenta que el sueldo de las distintas especialidades está referido al nivel de salarios de España, con un nivel de 648€.

Otro atributo significativo es la altura mínima de la zona de montaje de cada planta, o “Max height”, en la Tabla 13. El atributo se ha denominado así porque también limita la altura máxima de los productos implicados en las líneas de montaje que se le pueden asignar a la planta. Dicha altura, más un cierto margen, debe ser menor que el valor del atributo.

El atributo “Arriving/Departing means” incluye los medios de transporte que pueden llegar y partir de cada planta. Por ejemplo, no todas las plantas disponibles tienen un muelle en un curso navegable, o una pista de aterrizaje. Se incluye las identificaciones de los medios concretos, y no de los tipos de medios, porque es posible que se disponga de las instalaciones para un medio concreto, como el avión de carga APC, pero no para cualquier medio de ese tipo; por ejemplo el avión Beluga, por sus dimensiones podría no ser adecuado.

Las plantas que pueden ser designadas como los lugares de los que parten las piezas individuales tendrán como valor de su atributo “Posible origins” las identificaciones de las piezas cuyo origen pueden albergar. Se pueden dar situaciones en las que es posible elegir la planta origen de un determinado componente; y otras en las que eso ya vendrá dado de antemano, pues los proveedores ya están definidos. Ello se puede especificar definiendo las condiciones iniciales (en concreto la parte del PRD sobre las plantas) de una forma u otra.

Una planta puede, además, usarse únicamente como nodo intermedio para el cambio de medio de transporte; o bien considerarse como válida sólo como origen de componentes, pero no para albergar una línea de montaje. Para ello se debe especificar que su superficie disponible es nula.

	TYPE	ASSIGN- MENT	ATTRIBUTES		
			Name	Type	Unit
ATM	Air transport mean	Activity	Mean speed	Real	km/h
			Capacity	Real	Tm
			Model	String	
			Consump.	Real	l/km
			Fuel price	Real	€
			Service cost	Real	€/h
LTM	Land transport mean	Activity	Reach	Real	km
			Mean speed	Real	km/h
			Capacity	Real	Tm
			Model	String	
			Consump.	Real	l/100
			Fuel price	Real	€
IU	Industrial plant	Industrial node	Service cost	Real	€/h
			Reach	Real	km
			Cost rate	Real	€/s
			Useful surf.	Real	m ²
			Location	String	
			Arriving / Dep. means	String	
			Av. surface	Real	m ²
			Model	String	

Tabla 12: tipos de recurso correspondientes a medios de transporte aéreo y terrestre, y a plantas industriales.

	Id-TYPE	Name	ATTRIBUTES		
			Value	Type	Unit
AT2-Beluga A300 600 ST	Air transport mean	Mean speed	1020	Real	km/h
		Capacity	47	Real	Tm
		Consumption	6.52	Real	l/km
		Fuel price	0.4	Real	€/l
		Service cost	74000	Real	€/h
		Reach	4600	Real	km
LT1-Truck	Land transport mean	Mean speed	80	Real	km/h
		Capacity	18	Real	Tm
		Consumption	0,3	Real	l/km
		Fuel price	1,15	Real	€/l
		Service cost	450	Real	€/h
		Reach		Real	km
IU1	Industrial plant	Cost rate	600	Real	€/h
		Useful surface	15000	Real	m ²
		Location	Getafe, Spain	String	
		Arriving / Depart. means	AT1;AT2;LT1	String	
		Wage level	648	Real	€
		Max height	20	Real	m
		Possible origins		String	

Tabla 13: Modelos de un medio de transporte aéreo, de un medio terrestre y de una planta industrial.

5.4.2.4 Medios de transporte

Para cada transporte de componentes entre nodos de la red asignados a localizaciones distintas se requerirá, como resulta evidente, un medio de transporte. Desde el punto de vista formal, cada operación de transporte se considera un tipo de actividad que debe estar definida en el PRD. Por ello, se requerirá una serie de recursos dependiendo de cómo se haya definido el tipo.

En el caso del PRD definido para los casos prácticos, se ha incluido 3 tipos distintos de recursos relacionados con las operaciones de transporte, denominados “Air”, “Land” y “Sea transport mean”. La Tabla 12 muestra los dos primeros. Como se puede observar, la propiedad Assignment se ha definido como “Activity”, dado que se considera que los medios son sencillamente un recurso más que se puede asignar a ciertos tipos de actividades.

En la Tabla 13 se muestra la definición en el PRD comentado de 2 modelos de recursos de los tipos correspondientes a medios de transporte. Se trata de 2 vehículos concretos para el transporte aéreo y el transporte terrestre: un camión y el avión Beluga, diseñado específicamente para el transporte de componentes. En ambos se puede observar los distintos atributos, con su valor correspondiente. Dichos valores constituyen las prestaciones de cada vehículo y se emplearán para el cálculo de los distintos parámetros de la red.

En cuanto a la asignación de las operaciones de transporte necesarias en el proceso, en la metodología no se impone que las tenga que llevar a cabo la propia empresa encargada del montaje, ni que forzosamente deba realizarlo un contratista diferenciado. Se considera que ambas opciones, así como una combinación de las dos, son válidas.

5.4.3 Cálculo de parámetros de la red logística

La metodología incluye la evaluación de las distintas soluciones conceptuales para el proceso de montaje; además la determinación misma de la configuración óptima de la red de transportes implica una valoración de las posibilidades encontradas. Por tanto, es fundamental el cálculo de diversos valores asociados a la red logística.

En este apartado se explican las principales reglas usadas para el cálculo de los valores requeridos. Parte de las ecuaciones vienen de nuevo incluidas en la sección 6.1.4.6, donde se detalla el algoritmo definido para la definición automática de la red, concretamente la parte en la que se seleccionan los medios de transportes.

Previamente, se ha incluido también las hipótesis que se han asumido para todos los cálculos mencionados, así como algunas restricciones que se ha impuesto al sistema. Además, se especificará los valores dados por defecto a parámetros indefinidos debido al estado de desarrollo de la solución.

5.4.3.1 Hipótesis

La elaboración de las distintas reglas de cálculo de los parámetros de la red se ha apoyado en la asunción de diversos aspectos, lo que constituye las hipótesis del modelo de red logística que se ha desarrollado. Las hipótesis hacen que disminuya la precisión de los cálculos y la generalidad del modelo, pero son necesarias para la definición de un sistema efectivo de cálculo.

- *Línea síncrona:*

Se considera que todo el proceso de montaje sigue el esquema de línea síncrona (el paso de una estación a otra se hace con el mismo intervalo, que se denominará tiempo de ciclo). Los transportes se consideran equivalentes, dentro de la línea global, a estaciones. Por ello se definen de forma que no requieran un tiempo mayor, por unidad transportada, que dicho tiempo de ciclo. De otro modo el tiempo de ciclo del proceso aumentaría.

- *Transporte del mismo producto:*

Cada transporte sólo portará componentes o productos iguales. No se ha incluido en el modelo la posibilidad de transportar en el mismo vehículo productos intermedios distintos, por ejemplo desde los nodos que alberguen varias líneas de montaje.

- *Velocidad media:*

Se considera que todos los medios de transporte se desplazan durante los trayectos con la misma velocidad media, proporcionada como atributo de cada recurso específico.

- *Responsabilidad de los transportes:*

Como ya se ha comentado, la metodología soporta que el transporte se lleve a cabo usando recursos de la propia empresa o subcontratando a una distinta. Los precios se han considerado iguales en ambos casos, aunque en un caso real seguramente varíasen.

- *Coste horario de la ida*

El coste horario de cada medio de transporte, que se determina según el combustible gastado y el coste horario propio del servicio concreto, se imputa únicamente al trayecto de ida, en el que los medios están cargados con los productos.

- *Restricciones por el peso:*

No se ha tenido en cuenta las dimensiones de los productos para determinar si son aptos para el transporte con un medio dado. Se chequea, en cambio, que el peso del producto sea menor que la capacidad del medio.

- *Número de vehículos ilimitado:*

Existe un número ilimitado de recursos disponibles para el transporte. Se considera que esta parte de la metodología sirve para la determinación de las necesidades del proyecto. La adaptación a las condiciones particulares de la parte responsable del transporte en la fase de producción se hará más adelante en el ciclo de vida, si bien se podrá emplear para ello la información obtenida de la metodología a modo de guía (número de vehículos que serían necesarios y sus requisitos y rutas a cubrir, entre otras cosas).

5.4.3.2 Restricciones

Además de las hipótesis, también se han impuesto una serie de limitaciones al sistema, derivadas de consideraciones desde el punto de vista global de la producción. No obstante el valor definido para los parámetros relacionados se ha definido en base a estimaciones, y podría ser muy distinto en un caso industrial real.

- *Una sola escala:*

Se ha incluido la posibilidad de que se realicen paradas durante los trayectos, bien para cambiar de medio de transporte o porque la distancia a cubrir excede el alcance del medio elegido. Se ha limitado el número de paradas a una como máximo en cada trayecto, debido a que un número mayor no se considera ajustado a la realidad industrial, y requeriría una complejidad significativamente mayor del algoritmo desarrollado. En el prototipo desarrollado como primera implementación, además, se ha impuesto que se deba cambiar de medio, pues una parada para repostar no se corresponde con el tipo de actividad de transporte definido en el PRD que se ha descrito. Sin embargo en otros casos sí sería posible la inclusión de dicha posibilidad.

- *Número máximo de productos en viaje:*

En principio, el número de productos simultáneamente sólo debería estar limitado por la capacidad de cada medio, y es deseable que sea alto porque requerirá un menor número de viajes, y un menor coste. Sin embargo, se debe tener también en cuenta que si es un número muy alto, durante los primeros ciclos de la producción, muchas de las líneas de montaje se encontrarán inactivas, pues todavía no habrán llegado sus productos entrantes.

Si, por ejemplo, en un trayecto se transportan 10 productos desde un nodo industrial, A, al siguiente, B, durante los primeros 10 ciclos de producción en A no partirá ningún transporte y luego se tardará el tiempo de viaje correspondiente en alcanzar B; y durante todo ese tiempo, no podrá haber actividad productiva en B. Esto conduce a una situación que no es objeto de este trabajo: ¿Qué podría hacerse en B hasta que lleguen los primeros productos a la línea? Se ha impuesto un número máximo de elementos a transportar simultáneamente, que en la primera implementación ha tomado el valor de 30. Sin embargo, este valor se debe ajustar, como muestra, más adelante la Ec. 5.4.9.

5.4.3.3 Parámetros por defecto

Los distintos aspectos del modelo, principalmente la red logística, la distribución de la producción y organización de las líneas de montaje y la distribución de los elementos en las plantas, se encuentran relacionados entre sí. Diversos parámetros de cada aspecto o vertiente del problema tienen influencia sobre el resto. En el caso de la red de transportes, eso repercute en que se requiere el valor de distintos atributos de otros ámbitos para el cálculo de los atributos propios.

El problema radica en que existen varias posibilidades en cuanto al orden de ejecutar los distintos bloques. La Figura 22 de la sección 5.1.5, muestra un diagrama con las posibles secuencias a seguir. La red de transportes se puede determinar tanto antes como después de la definición de las líneas y sus distribuciones espaciales. Por lo tanto, si se da el primer caso, ciertos atributos no se podrán determinar, pues las partes asociadas del proceso no se habrán definido aún, y se deberá emplear valores por defecto en diversos cálculos relacionados con la logística.

La Tabla 14 muestra los parámetros que se deben estimar de esta forma y los valores tomados por defecto. Dichos valores únicamente son válidos para un producto concreto sobre el que se aplique la metodología. Los valores mostrados se han determinado para el caso de estudio CU2, que se describe en la sección 9.2. Los parámetros son el coste asociado a cada línea de montaje, la superficie que ésta requerirá y el tiempo de ciclo del proceso. Se ha hallado el valor por defecto de estos parámetros calculando la media del valor en pruebas anteriores, en el caso de los dos primeros; y empleando el valor objetivo especificado como propiedad del sistema, en el caso del tiempo de ciclo.

	SYMBOL	VALUE
Costs of the assembly line of Industrial Node i (€)	C_i	30000
Required surface for Node i (m^2)	RS_i	4000
Cycle time (real h)	TC	144

Tabla 14: valores por defecto de algunos atributos del montaje, para el caso de estudio CU2.

5.4.3.4 Reglas de cálculo

A continuación, se incluirá las distintas ecuaciones desarrolladas para el cálculo de los distintos parámetros del sistema relacionados con la red de transportes. Algunas ecuaciones se incluyen también en la sección 6.1.4.6, como se indicaba anteriormente. La Tabla 15 incluye la nomenclatura empleada.

Uno de los atributos más importantes que se debe calcular es el coste asociado a la red, CL, que se calcula según la Ec. 5.4.1. Como se puede observar, es la suma de los costes de transporte y del coste relacionado con las plantas, que a su vez se pueden calcular mediante las ecuaciones Ec. 5.4.2 a Ec. 5.4.6.

$$CL = \sum_{\substack{i=1 \\ j \text{ next to } i}}^{NLN} [CoT_{ijs} + CP_i] \quad \text{Ec. 5.4.1}$$

Los subíndices i, j y s se refieren a un nodo industrial determinado, el nodo siguiente en la red y el transporte entre ambos, respectivamente. El coste de uso de una planta p por cada ciclo, CP_{ip} , tiene en cuenta el coste de uso de su superficie disponible y la parte proporcional del porcentaje de ella asignado a ese nodo industrial, cuando varios nodos están asociados a esa planta (Ec. 5.4.2). Se define el parámetro CP^*_{ip} , que incluye el coste de actividades de montaje, o un valor de referencia, y una ponderación del nivel de salarios (Ec. 5.4.3). Se usará este parámetro en evaluaciones realizadas cuando parte de la solución no está definida.

$$CP_{ip} = \frac{RS_i \cdot CH_p \cdot TC}{\sum_{k=1}^{NLN_p} RS_k} \quad \text{Ec. 5.4.2}$$

$$CP^*_{ip} = CP_{ip} + \frac{CnoT_{i0} \cdot WL_i}{WL_0} \quad \text{Ec. 5.4.3}$$

Para el cálculo del coste de transporte asociado a un trayecto i, j, s, CoT_{ijs} , se emplea el coste horario del medio, el tiempo de viaje, el coste de las operaciones de carga y descarga y la frecuencia (Ec. 5.4.4). El coste horario se calcula según la Ec. 5.4.5, incluyendo el número de unidades que se transportan, el coste horario del servicio, el precio del combustible, el índice de consumo por km del medio y su velocidad media. La idea básica de la ecuación es la de usar un coste horario del servicio ajustado a la capacidad del recurso que se esté empleando, a lo que se debe añadir un extra que depende del precio y el gasto de combustible.

El tiempo de viaje se calcula mediante la Ec. 5.4.6, usando los valores de distancias tabulados. El cálculo del coste de las actividades de carga y descarga se realiza según las reglas establecidas en el modelo principal (sección 5.5).

$$CoT_{ijs} = [CHM_{ijs} \cdot TM_{ijs} + NE_{ijs} \cdot (CAL_{ijs} + CAu_{ijs})] \cdot f_{ijs} \quad \text{Ec. 5.4.4}$$

$$CHM_{ijs} = \frac{NE_{ijs} \cdot WP_o}{WC_s} \cdot CS_s + CF_s \cdot FR_s \cdot ST_s \quad \text{Ec. 5.4.5}$$

$$TM_{ijs} = D_{ijs}/ST_s \quad \text{Ec. 5.4.6}$$

La frecuencia y el número de elementos requieren cálculos más complejos. Se entiende por frecuencia, en este caso, al número de veces que se debe realizar el transporte durante un ciclo para no incrementar el tiempo de ciclo objetivo. Se entiende por número de unidades, o de elementos, a las unidades que son transportadas simultáneamente. La frecuencia será, por tanto, el inverso del número de elementos (Ec. 5.4.7).

- CL es el coste total asociado a la red logística de una alternativa
- NLN es el número de nodos de la red, igual o menor que el de nodos industriales.
- CP_i es el coste de la planta seleccionada para un nodo de la red i
- CoT_i es el coste del transporte asociado a un nodo de la red i
- $CnoT_i$ es el coste asociado a un nodo industrial i sin tener en cuenta el transporte
- f_{ijs} es la frecuencia de viajes entre dos nodos i y j si se emplea el medio s .
- CH_r es el coste horario del recurso r .
- RS_i es la superficie requerida para la línea de montaje de un nodo industrial.
- WL_i es el nivel de salarios asociado a una planta por el país en que se encuentra.
- TM_{ijs} es el tiempo de viaje entre los nodos i y j con un medio de transporte s .
- NE_{ijs} es el número de elementos o componentes que se pueden transportar simultáneamente entre los nodos i y j empleando el medio s .
- NE_{MAXijs} es el número máximo de componentes a transportar entre los nodos i y j con el medio s .
- NE_{MAX0} es un valor de referencia que tiene en cuenta el número de componentes que no están siendo procesados hasta que se completen los primeros ciclos de producción.
- CAl_{ijs} y CAu_{ijs} son el coste por ciclo de las actividades de carga y descarga implicadas en el transporte entre los nodos i y j empleando el medio s .
- CHM_{ijs} es el coste horario de una operación de transporte entre nodos i y j con el medio s .
- WPO es el peso en Tm de una unidad de los componentes a transportar
- WC_s es la capacidad de carga en Tm del medio s .
- CS_s es el coste del servicio de transporte para la capacidad completa del medio.
- CF_s es el coste del combustible del medio s en €/l.
- FR_s es la tasa de consumo del medio s en l/km.
- ST_s es la velocidad media del medio s .
- D_{ijs} es la distancia a recorrer para el transporte entre nodos i y j con el medio s .
- TJ_{ijs} es el tiempo requerido para el trayecto, carga y descarga entre dos nodos i y j con el medio s .
- Tl_{ijs} y Tu_{ijs} son el tiempo de duración de las actividades de carga y descarga implicadas en el transporte entre los nodos i y j empleando el medio s .

Tabla 15: nomenclatura para las reglas del cálculo de parámetros de la Red Logística.

El número de elementos está limitado por la capacidad de carga del vehículo empleado y el peso del producto saliente WPO . Sin embargo, existe otro límite, NE_{MAX} , que se debe a la espera máxima que puede generar el primer envío de componentes. Así, el número de elementos se puede determinar de dos formas posibles (Ec. 5.4.8). El límite se calcula mediante un valor de partida NE_{MAX0} , que se corrige con el tiempo de transporte completo y el tiempo de ciclo, en la Ec. 5.4.9. La función Int obtiene la parte entera de un número real. El tiempo de transporte se calcula de forma sencilla en la Ec. 5.4.10, con la duración del trayecto y de la carga y descarga.

$$f_{ijs} = 1/NE_{ijs} \quad \text{Ec. 5.4.7}$$

$$NE_{ijs} = \begin{cases} NE_{ijs}' = Int\left(\frac{WC_s}{WPO}\right), & NE_{ijs}' < NE_{MAXijs} \\ NE_{MAXijs}, & NE_{ijs}' \geq NE_{MAXijs} \end{cases} \quad \text{Ec. 5.4.8}$$

$$NE_{MAXijs} = NE_{MAX0} - Int\left(\frac{TJ_{ijs}}{TC}\right) - 1 \quad \text{Ec. 5.4.9}$$

$$TJ_{ijs} = NE_{ijs}(Tl_{ijs} + Tu_{ijs}) + TM_{ijs} \quad \text{Ec. 5.4.10}$$

5.4.3.5 Cálculo del peso

La estimación de la masa de componentes en productos a través de su representación digital es una realidad gracias al desarrollo de las aplicaciones CAD, que actualmente en muchos casos incorporan métodos de cálculo por elementos finitos, además de la posibilidad de definir propiedades relativas a un material, como su densidad. También es posible estimar la masa en modelos con bajo nivel de definición, o basándose en definiciones paramétricas, como plantean Hürlimann et al. en su trabajo [86].

La metodología propone, si el modelo tiene el suficiente grado de definición, emplear la funcionalidad del entorno base que calcula el peso de un componente o montaje, dado que se requiere de una implementación basada en un entorno CAD/CAM que en el caso del prototipo fue CATIA V5. Dicha funcionalidad tiene en cuenta la propiedad de densidad de los distintos materiales de las piezas, por lo que para su uso es preciso que la mayoría de los componentes del producto ya se encuentren presentes en el modelo digital, y tengan un material asignado.

Sin embargo, por sus características, el uso más habitual de la metodología implicará modelos de producto en el que, al menos en parte de los componentes y sub montajes, no haya un nivel elevado de definición. Por ejemplo que la geometría sea muy básica, que falte un alto número de piezas o que no haya materiales asignados. En esos casos, el cálculo de la masa mediante los procedimientos del entorno conducirá a un valor muy poco preciso.

Para esos casos se propone la definición de una densidad aparente, que no se corresponderá con la de ningún material concreto sino más bien coincidirá con una media ponderada de todos. El cálculo consistirá en multiplicar dicha densidad aparente por el volumen de cada producto que, esta vez sí, será calculado mediante las herramientas del entorno. La densidad aparente se calculará conociendo el peso total del producto, que debería ser un dato de partida, y el volumen total del mismo.

La Tabla 16 muestra la forma en que se ha calculado la densidad en las distintas zonas del modelo del caso de estudio CU2. Los datos de entrada para los cálculos que se describen son principalmente los pesos de diversas zonas de la aeronave, incluidos en la segunda columna de la tabla. Se obtuvieron de la información sobre el modelo Airbus A400M disponible en internet.

Figura 27: pieza LFAN1 del modelo de producto del CU2, con propiedad “Apparent Density” definida.

En primer lugar se calculó la densidad de las piezas correspondientes a zonas con una distribución de la masa distinta del resto. Se calculó así que la densidad aparente de la pieza que representa cada motor o Fan debía ser de 6859 kg/m³. El volumen total del modelo se calculó empleando CATIA V5. Como la geometría se había construido como un cascarón hueco de 10 mm de espesor, el volumen era muy pequeño para un avión: 14.188 m³. Se le descontó al peso que tiene el producto, 70 Tm, el peso del sistema de aterrizaje y el de los 4 motores. La densidad aparente del componente correspondiente al fuselaje central inferior (“CFL”), que incluye el sistema del tren de aterrizaje, se determinó con el peso del volumen de material del modelo con la densidad calculada para el resto del avión, a lo que se sumó el peso de las ruedas y del sistema del tren, que pesan 1000 y 1900 respectivamente.

La densidad aparente se asoció a los documentos CAD correspondientes como un a propiedad. Así para calcular el peso de cualquier componente individual basta con llamar a la función del entorno que calcula el volumen, y multiplicarlo por la densidad aparente. La Figura 27 muestra la pieza representativa del motor izquierdo interior con la propiedad y su valor.

PRODUCT	WEIGHT (kg)	VOL.(m ³)		Apparent Density (kg/m ³)
FAN	1900	0.277	1900 / 0.277	6859
Aircraft	70000	14.188	$\frac{70000 - 4 \cdot 1900 - 14 \cdot 250 - 1000}{14.188}$	4081
CFL	250 (one gear); 1000 (landing system)	2.64	$\frac{1000 + 14 \cdot 250 + 4081 \cdot 2.64}{2.64}$	5785

Tabla 16: cálculo de la densidad aparente de distintas partes del modelo producto empleado en el caso CU2.

5.5 Modelo de costes y tiempos

Se ha denominado modelo de tiempos y costes a la forma de integrar todos los parámetros relacionados con estos conceptos en la metodología. Con ello se engloba diversas magnitudes asociadas, distintos tipos de costes y tiempos, el concepto de eficiencia en el uso de los recursos o la incertidumbre de cualquiera de ellas. Además el modelo también incluye las reglas que relacionan todos esos parámetros entre sí.

En este apartado se describirán todos los conceptos mencionados, comenzando por un conjunto de definiciones de términos relacionados, tras lo que se detallarán las magnitudes que se consideran representativas para la valoración de una solución. Se explicará, asimismo, la inclusión del concepto de incertidumbre y su propagación en el modelo. El apartado también incluye las hipótesis relativas al cálculo de tiempos y costes seguidas, y todas las reglas de cálculo definidas. Finalmente se explicará la modelización del fenómeno de aprendizaje que se ha adoptado y sus implicaciones sobre los tiempos y costes del proceso.

5.5.1 Definiciones

Para poder explicar la parte del modelo que cubre los tiempos y los costes del proceso de montaje, se requiere usar una serie de términos empleados en el campo de la fabricación, y otros que se emplean de forma libre en la metodología. Se ha considerado oportuno incluir las definiciones que se han tenido en cuenta para todos ellos.

5.5.1.1 Costes Recurrentes y No Recurrentes

Se denomina Costes Recurrentes a los que se repiten durante el proceso, con cada nueva unidad de producto. Un ejemplo de coste recurrente sería la compra de materiales o el coste asociado a la utilización de un recurso. En cambio, los costes no recurrentes serán aquéllos en los que se incurre una única vez en toda la serie o un número de veces independiente de la frecuencia de producción [83][88].

5.5.1.2 Costes Fijos y Variables

Se considera costes fijos a aquéllos asociados a un proyecto de fabricación que no varían con el tamaño de la serie producida. Se considera que los costes variables sí varían con el número de unidades producidas. Estas dos definiciones pertenecen a un enfoque de los costes basado en el volumen de producción o enfoque tradicional [83][84][85][88].

5.5.1.3 Costes Directos e Indirectos

Los costes directos se definen como los que se pueden asociar a una actividad relacionada con la producción. Los indirectos son aquéllos en los que es necesario incurrir durante el ciclo de vida del producto pero no presentan una relación con actividades concretas que permita asociarlos al nivel de producción. Los modelos de costes basados en actividades tienen como objetivo relacionar la mayor cantidad de costes con actividades de la empresa asociadas con la producción según su nivel de incidencia, o minimizar la cantidad de costes que se clasifican como indirectos. Para ello se incluyen como actividades productivas muchas de las que tradicionalmente se consideraban fuentes de costes indirectos, como tareas de oficina o de mantenimiento de las instalaciones [83][85][88].

5.5.1.4 Tiempo de ciclo

En la fabricación de un producto, es el tiempo que requiere cada etapa para completarse. Si se trata de una línea de montaje síncrona, donde cada estación representa una etapa, el tiempo de ciclo es un valor único a lo largo de toda la línea. Los productos pasan de una estación a la siguiente cuando la unidad anterior ya la ha completado, según una frecuencia constante, llamada ritmo de producción e inversamente proporcional al tiempo de ciclo [22][23][25].

5.5.1.5 Tiempo de entrega

Se define como el tiempo que tarda un producto en ser fabricado y entregado desde que se hace su pedido [35]. Su valor está altamente influenciado por la configuración de la línea de montaje [23]. En la metodología, dado que únicamente se abarca el proceso de montaje (o una parte del mismo, según cada caso concreto) del producto final, se ha considerado un tiempo de entrega medido desde la salida del primer componente con rumbo al primer nodo industrial de la red hasta la finalización de la última estación de la línea de montaje final, en el nodo industrial principal.

5.5.1.6 Tiempo de ciclo y “Takt time” en la literatura

Tanto en la literatura científica relativa a la ingeniería de fabricación como textos de divulgación existe una discrepancia acerca del significado del término Tiempo de Ciclo. En fuentes relacionadas con métodos de representación y optimización de la línea de montaje, lo habitual es que utilicen dicho término para referirse al tiempo entre el paso de dos unidades consecutivas en producción por el mismo punto de la línea, o entre el inicio de dos etapas consecutivas; siempre que se trate de líneas síncronas [22][23][25][104]-[106].

En cambio, en otros textos emplean el término “Takt Time” para designar el concepto descrito arriba, utilizando la palabra alemana “takt”, que significa reloj o cadencia. Esos autores emplean “Tiempo de Ciclo” para referirse al tiempo total que se requiere para que un producto complete el proceso completo. Esta interpretación es más habitual en enfoques que consideran la producción global [5][15][16][102].

En esta tesis se emplea el término según la primera corriente, de manera coherente con la definición aportada en el apartado 5.5.1.4.

5.5.1.7 Tiempo de trabajo y tiempo real

Estos dos conceptos se emplean en la metodología considerando que el tiempo de trabajo es la suma de las horas de actividad que se requiere para una determinada operación, estación o cualquier otra subdivisión de la línea de montaje global. Se considera tiempo real al tiempo natural, que transcurre de forma continua (e inexorable). Dado que se han considerado jornadas de 8 horas de duración, el tiempo real diferirá del tiempo de trabajo para valores mayores. Por ejemplo, si una etapa requiere 13 horas de trabajo, el tiempo real para su finalización será de 29 horas (se ha superado la duración de 1 jornada, por lo que se cuentan 24 horas, a lo que hay que sumarle las 5 horas que restaban del tiempo de trabajo requerido).

La metodología soporta que en una estación dada se hagan turnos dobles o triples, es decir, se trabaje 16 o 24 horas en lugar de 8 cada día, para reducir el tiempo de fabricación. Sin embargo, en esos casos el tiempo se referencia a la jornada estándar de 8 horas: simplemente se considera que el tiempo de las actividades correspondientes se reduce (a la mitad o la tercera parte según si son turnos dobles o triples, respectivamente). Además, se considera en esos casos un consumo de recursos doble o triple. De esa forma la transformación entre tiempo de trabajo y real, y el modelo de tiempos en general se puede aplicar tanto a estaciones con turno sencillo como doble o triple.

5.5.2 Parámetros de evaluación

En este apartado se describen los parámetros que se calculan para determinar la calidad de cada solución conceptual para el proceso de montaje generada. Dichos parámetros están relacionados con los tiempos del proceso, sus costes y la eficiencia en el uso de los recursos asignados. Para cada uno de estos aspectos, se detalla por qué se considera importante, las consideraciones sobre él que se han tenido en cuenta al elaborar el modelo y se justifica la forma de calcular cada parámetro del sistema relacionado. La Tabla 17 incluye la nomenclatura empleada.

5.5.2.1 Tiempos

El tiempo en la producción es una magnitud con una gran importancia. La duración del proceso de fabricación de un producto determinará su fecha de salida al mercado, que puede ser crítica para las ventas. En ese caso se estaría hablando del tiempo de entrega. Por otro lado, los tiempos en los procesos también están relacionados de forma directa con los costes asociados.

El coste de la utilización de un recurso viene dado por su coste horario y el tiempo que está asignado a una actividad. Si se dispone de recursos rápidos, aunque sean más caros, es posible que contribuyan a reducir el tiempo de ciclo, por lo que los costes también podrían verse reducidos.

En el modelo, se considera que el proceso de ensamblado del producto constituye una línea de montaje global, que incluye también el transporte entre las plantas industriales asignadas. Se considera en todo momento que dicha línea es síncrona, es decir, posee un único valor de tiempo de ciclo y todas sus etapas tienen esa duración. El tiempo de ciclo del proceso se calcula como el máximo de la duración de todas las estaciones de los nodos industriales. Por tanto, si hay estaciones con una duración mucho menor, tendrán un tiempo improductivo.

Además, en la línea global se requiere el transporte de componentes entre plantas industriales. Dichas actividades de transporte se consideran etapas de la línea, análogas a las estaciones. En la metodología se sigue la directriz de ajustar los transportes de forma que no modifiquen el tiempo de ciclo, que vendrá dado por las actividades de montaje. Sin embargo, el tiempo de transporte no tiene por qué ser menor o igual que el tiempo de ciclo. Gracias a que los medios de transporte pueden cargar varias unidades de la mayoría de productos intermedios simultáneamente, se pueden considerar trayectos que tengan una duración mayor que el tiempo de ciclo.

En realidad, cada transporte de la red logística se hará con una frecuencia inversamente proporcional al número de unidades que se lleven. Se considera que si un transporte, incluso teniendo en cuenta el número de productos simultáneos, requiere un tiempo mayor que el tiempo de ciclo, se asignarán más unidades de ese medio de transporte para cubrir la demanda de productos en el nodo destino.

Figura 28: representación de los tiempos en el modelo, según la hipótesis de línea síncrona.

Nomenclatura general:

- TNS es el número total de estaciones dentro del proceso.
- NIN es el número de nodos industriales de una alternativa
- CH_r es el coste horario del recurso r .
- NC_i es el número de hijos de la estación o actividad compuesta i .

Ecuaciones de tiempos:

- TC es el tiempo de ciclo, entre el mismo paso para dos unidades a producir consecutivas.
- TT es el tiempo total requerido para el ensamblado de un producto completo
- T_i es la duración del elemento i del proyecto (nodo industrial, estación, actividad,...).
- TM_i es la duración medida empíricamente para la actividad simple i
- NE_i es el número de elementos de la actividad simple i (número de taladros, remaches,...)
- ST_i es la velocidad del recurso principal usado al medir la duración del tipo de la actividad i .
- $SR1$ es la velocidad del recurso principal finalmente asignado a la actividad i .
- $NP1_i$ es el número de hijos de la actividad i con prioridad de valor 1 (sin relaciones de precedencia con hijos previos)
- NH_i es el número de turnos definido para la estación a la que pertenece la actividad i .
- TE_j es el "Tiempo hasta el final", desde el inicio de la actividad j hasta que finaliza su padre.
- NAS_j es el número de actividades que tienen la actividad j como precedente directa.
- BNS_k es el número máximo de estaciones en rama del nodo k , o el mayor número de ciclos (estaciones y transportes) de las ramas de la red logística que conducen al nodo k .
- NPr_k is the number of direct precedent nodes of industrial node k .
- NS_{kl} es el número de estaciones que se completarán en el nodo k tras la entrada al mismo del producto proveniente del nodo l .
- NoS_j es el número de escalas definido para el transporte desde el nodo l .

Ecuaciones de costes:

- C es el coste total, del proceso de montaje considerado.
- $CnoT$ es el coste total, excluyendo el transporte de componentes.
- C_i es el coste del nodo industrial i .
- CoT_i es el coste del transporte desde el nodo i al siguiente nodo en la red.
- NS_i es el número de estaciones en la línea del nodo industrial i .
- CA_j es el coste de la estación o la actividad j .
- NR_k es el número de recursos asignados a la actividad k (o a actividades del nodo k).
- W_r es la paga por hora del recurso humano r .
- WE_r es la paga por hora del recurso humano r en horarios especiales.
- CS_r es la parte del valor total pendiente de amortizar del recurso r .
- EL_r es la esperanza de vida restante del recurso r .

Ecuaciones de eficiencia:

- E es la eficiencia global del proceso de montaje considerado.
- E_r es la eficiencia asociada al uso del recurso r .
- T_{ar} es la duración de la actividad a , a la cual el recurso r está asignado.

Ecuaciones de incertidumbre:

- UTC es la incertidumbre en la estimación del tiempo de ciclo.
- UTT es la incertidumbre en la estimación del tiempo total del proceso.
- UT_i es la incertidumbre en la estimación de la duración de una actividad i .
- UTM_j es la incertidumbre de duración asociada a una actividad j por su tipo y bajo unas condiciones, con recursos de un tipo determinado y un único elemento.
- UTE_j es la incertidumbre del "Tiempo hasta el final" de una actividad j dentro de otra compuesta.
- UC es la incertidumbre en la estimación del coste del proceso.
- UC_i es la incertidumbre en la estimación del coste de un elemento i .
- UCL_i es la incertidumbre del coste logístico de un elemento i .

Tabla 17: nomenclatura de las reglas de cálculo de tiempos, costes, eficiencia e incertidumbre y generales.

Los tiempos en el modelo pueden representarse mediante el diagrama de la Figura 28. El diagrama incluye 4 nodos industriales: a, b, c e i, las 3 estaciones incluidas en el último, y los transportes entre los nodos. Como se puede observar, cada uno de estos elementos requiere un tiempo. Cualquiera de los tiempos de las estaciones puede representar el tiempo de ciclo, que finalmente coincidirá con el tiempo de realización mayor. Los tiempos de los transportes no influyen en el tiempo de ciclo, pero sí que ocurre al revés. Cuanto menor sea el tiempo de ciclo, la distancia entre las localizaciones de los nodos se irá limitando y los transportes requerirán un mayor número de medios para poder respetarlo.

En cuanto a los parámetros relacionados con el tiempo que se calculan en la metodología, se trata de 3 tipos distintos. En primer lugar, se calcula el tiempo de duración de actividades simples, compuestas, estaciones y líneas de montaje; también se determina el tiempo de duración de los viajes, aunque únicamente para ajustar las condiciones de los transportes. El tiempo de duración de una actividad compuesta o estación se calcula teniendo en cuenta la secuencia de precedencias de sus actividades hijas que sea más larga.

El tiempo de una actividad simple se calcula mediante la información empírica inicial, que debe estar contenida en el PRD, extrapolándola a los recursos específicos asignados. La Tabla 18, en la sección 5.5.3, contiene los tiempos empíricos de las actividades simples del PRD definido para los casos de estudio. Se calcula el tiempo de ciclo de todo el proceso, como el mayor de entre los tiempos de duración de las estaciones. Por último, se calcula el tiempo de entrega del producto, multiplicando el tiempo de ciclo por el número de etapas del brazo más largo de la red que recorren los productos intermedios.

Por ejemplo, en la Figura 28, habría 3 brazos distintos que recorrerían los componentes durante el montaje: el paso por las estaciones del nodo b, el transporte al nodo i y las 3 estaciones de dicho nodo; el paso por las estaciones del nodo a, el transporte a i y sus 3 estaciones; y el paso por las estaciones del nodo c, el transporte y la última estación del nodo. El tiempo de entrega se calcularía multiplicando el tiempo de ciclo por el mayor número de estaciones de las 3 ramas descritas.

En la determinación del tiempo de duración de las actividades también se ha tenido en cuenta el efecto del aprendizaje: que un trabajador complete una tarea más rápidamente si la ha realizado más veces con anterioridad. Sin embargo esto no se ha tenido en cuenta de forma exhaustiva para el cálculo del tiempo de entrega de un mismo avión, sino que se considera que el tiempo de ciclo es igual durante todo su proceso de montaje. No obstante, en realidad el tiempo de ciclo no puede variar de forma continua puesto que ello requeriría modificaciones constantes en la red de transportes, lo cual no se considera factible.

5.5.2.2 Costes

Otro aspecto fundamental del proceso de montaje es el relacionado con sus costes. Éstos pueden determinar la viabilidad de un proyecto de fabricación, por lo que su estimación en las primeras etapas del diseño del proceso, o incluso el diseño del mismo empleando el coste como criterio de optimización, se considera muy ventajoso [1][16][17][23][25][26].

En la metodología, respecto a los costes se ha seguido el enfoque basado en actividades. En el nivel de la producción al que se orienta, esta perspectiva puede coincidir en gran medida en cuanto al valor obtenido con el enfoque basado en la producción. Sin embargo la forma de calcular el coste difiere, dado que la visión tradicional se basa en determinar el coste de cada unidad producida, mientras que la perspectiva basada en actividades plantea determinar el coste por el uso de los recursos asignados a las tareas del proceso.

Además, el meta modelo de clases definido puede soportar diccionarios PRD en los que se incluyan actividades pertenecientes a niveles de la producción superiores, como mantenimiento de equipos e instalaciones, tareas de planificación y de oficina técnica, o gastos asociados al consumo de energía. Para esos casos, el enfoque basado en actividades posibilita una fácil inclusión de sus costes en el modelo.

El enfoque basado en actividades no implica que no se calcule el coste imputable a cada unidad producida, sino que se realice por otros medios, como calcular el coste diario o semanal de todas las actividades del modelo y multiplicarlo por el tiempo que se requiere para fabricar cada unidad. De esa forma, se introducirán como costes asignables muchos de los que según el enfoque tradicional se catalogaban como indirectos.

Por tanto, los costes se calculan empleando el valor del coste horario de los distintos recursos asignados. Dicho coste horario se calcula utilizando los años de su esperanza de vida útil, sin tener en cuenta la depreciación del producto. Se trataría de una amortización de valor constante cada año.

Los costes que se calculan en la metodología en su mayoría están referidos al tiempo de ciclo, es decir, a un ciclo. El coste de una actividad simple vendría dado por el coste horario de los recursos que tenga asignados, multiplicado por la duración de la actividad. Sin embargo, si los recursos asignados no se aprovechan el resto del tiempo de ciclo, el coste asociado también se debería imputar a la actividad, luego los costes horarios se deberían multiplicar por el tiempo de ciclo, independientemente de lo que dure la actividad. Por otro lado, si un recurso es compartido por varias actividades simples, el coste de utilización se habrá de repartir entre ellas. La estimación de costes desarrollada tiene en cuenta dichos factores.

En la metodología desarrollada, los costes se calculan de dos formas en función del grado de definición de la alternativa. Si el proceso de montaje o el nodo industrial que está siendo evaluado tienen los recursos totalmente definidos, es decir, se sabe el número definitivo de unidades de cada modelo de recurso y cuáles se comparten entre actividades; el cálculo de costes se hace repasando cada uno de ellos. Para cada nodo industrial que se evalúa, se suma los productos del coste horario de cada recurso y el tiempo de ciclo (multiplicando, para compensar, por el máximo número de turnos de las estaciones a las que cada recurso está asignado).

Si aún no se ha definido los recursos finales, los costes se calculan teniendo en cuenta las actividades. El coste de cada una será igual al coste horario de sus recursos asignados multiplicado por el tiempo de ciclo. Si la actividad es compuesta, se le sumará además los costes de sus actividades hijas.

Además, se calcula el coste total, asociado al montaje de una unidad completa. Para ello, la alternativa debe estar totalmente definida, mediante la ejecución de todas las etapas de la metodología. Los costes por ciclo de todos los nodos industriales se deben haber calculado siguiendo el primer camino de los dos descritos anteriormente, puesto que se conocerán los recursos específicos asignados al proceso. Se suma, por tanto, el coste por ciclo de todos los nodos y el de todos los transportes definidos. El total corresponderá al coste del proceso de montaje cada ciclo, lo que, según el modelo propuesto, coincidirá con el coste de un producto entero, puesto que incluye la realización de todas las operaciones del proceso.

Si se tiene en cuenta la curva de aprendizaje, el coste de una unidad no se corresponderá con lo anterior, pues cada estación se completará en un tiempo distinto, según las veces que se han repetido las operaciones que comprende (para ello también influye el número de elementos de las uniones). Por ello, se debería ajustar el tiempo de duración de cada estación. Sin embargo, un cambio del tiempo de ciclo debido a la curva de aprendizaje debe comunicarse a toda la línea, y la configuración de la red de transportes puede dejar de ser adecuada, por lo que habría que adaptarla en algún punto.

Todo ello no se ha incluido en el modelo, pero puede ser interesante como desarrollo futuro estudiar la posibilidad de que se revise con cierta frecuencia el tiempo de ciclo y la red logística, para adaptarse a la curva de aprendizaje.

Los costes asociados a los transportes, aunque éstos se consideran un tipo más de actividad, se calculan siguiendo unas fórmulas distintas. Se sigue el procedimiento incluido en la sección 5.4.3.4 y que se explica detalladamente en la sección 6.1.4.6.

5.5.2.3 Eficiencia

La eficiencia se ha definido en la metodología, para un proceso de montaje dado, como el porcentaje del coste de la utilización de todos los recursos asignados que se corresponde con tiempo de uso de los mismos, y no tiempo improductivo. Se considera que el tiempo que el recurso está asignado al proceso de montaje es el 100% del tiempo de ciclo. Es decir, si bien el modelo soporta la posibilidad de que se compartan un recurso entre actividades e incluso estaciones, se excluye que pueda estar asignado a varios proyectos distintos.

Se considera que la eficiencia es un valor importante, puesto que indica si una solución del proceso de montaje no está aprovechando adecuadamente los recursos asignados. Normalmente ello implica que dicha solución puede conseguir los mismos resultados en cuanto a tiempos con menores costes, o que se podría mejorar los tiempos manteniendo el coste asociado.

En caso de que varias soluciones obtengan resultados similares en tiempos y costes aquélla que obtuviera una peor valoración de su eficiencia será la que presente mayores oportunidades de mejora, pero sin embargo será la peor valorada. No se ha de deducir de ello que la eficiencia deba ser un parámetro cuyo aumento empeore una solución. En realidad una eficiencia alta siempre es deseable para una solución, pues indica un adecuado aprovechamiento del coste. Una solución con baja eficiencia nunca será una candidata a su selección, previamente requerirá un trabajo de mejora, que incremente dicho valor, con lo que con toda probabilidad se mejorará los costes y el tiempo.

Así, se sienta una base para un trabajo futuro que puede consistir, en un sistema que asista en la mejora de soluciones basándose en su eficiencia, teniendo en cuenta un margen de mejora y dirigiendo los esfuerzos a los nodos más optimizables de cada solución.

En la metodología desarrollada, se calcula la eficiencia en el uso de los recursos como la media del porcentaje de tiempo de trabajo que un recurso está siendo utilizado, ponderada según el coste horario de cada recurso.

5.5.3 Gestión de la incertidumbre

Una característica fundamental de la metodología es su utilidad para estimar los valores de costes, tiempos y eficiencia de soluciones conceptuales del proceso de montaje. Dado que son valores que pueden servir para tomar una decisión en la selección de alternativas, se ha juzgado necesario incluir también el cálculo de la incertidumbre asociada a cada uno, de forma que el encargado de decidir pueda también valorar la precisión de los resultados. El sistema desarrollado para la evaluación de alternativas según la lógica borrosa también tiene en cuenta la incertidumbre de forma explícita.

El cálculo de la incertidumbre asociada a los distintos parámetros del modelo se realiza aplicando una serie de fórmulas que se han obtenido según la regla de la propagación de errores. Dicha regla establece que, sea una magnitud m cuyo valor viene dado por una función de varios parámetros, como muestra la Ec. 5.5.1, la incertidumbre de dicha magnitud se puede calcular en función de las incertidumbres de sus parámetros, tal y como se expresa en la Ec. 5.5.2.

Modelos

$$m = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{Ec. 5.5.1}$$

$$u(m) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i}(x_i) \cdot u(x_i) \right]^2} \quad \text{Ec. 5.5.2}$$

Para los costes, tiempos y eficiencia del modelo, se puede desarrollar un sistema de ecuaciones que permita calcular sus incertidumbres asociadas siguiendo la regla de propagación de errores. Sin embargo, la propagación implica que es necesario disponer de unos valores de partida, unas incertidumbres para los elementos más básicos del modelo (en la metodología, las actividades simples), del mismo modo que para la estimación de tiempos y costes es imprescindible una información inicial. En el caso de la incertidumbre, estos valores iniciales se proporcionan como parte de la información de partida, dentro del PRD, y consiste en unos intervalos de confianza para los valores de los tiempos de las actividades simples, que también se proporcionan como parte de la información inicial.

$$\sigma^2 \approx \sum_{i=1}^n \frac{(\bar{x} - x_i)^2}{n^2} \quad \text{Ec. 5.5.3}$$

$$U_{95} = 1.96 \cdot \sigma, \quad P[X \in \bar{x} \pm U_{95}] = 95\% \quad \text{Ec. 5.5.4}$$

Id	ACTIVITY	VARIANT	TIME 1EL./ 1RES. (s)	U ₉₅ (%)	RES. SPEED
G1	Generic	Manual	600	10	0,5
G2		Auto	500	5	0,5
M	Moving	-	1500	5	1
PJ1	Positioning at jig	Base component	3000	15	1
PJ2		Added component	2250	12	1
T1	Testing	Structure alignment	900	20	1
T2		Structural continuity	900	20	1
T3		Mechanical tests	900	20	1
T4		Neumatic and fluids systems	1500	20	1
T5		Electronic systems	900	20	1
T6		Electric systems	900	20	1
T7		Set of systems	4500	20	1
T8		Dimenssion measurement	300	20	1
N	Nesting	-	600	6	1
SI1	System installation	Neumatic and fluids systems	900	5	1
SI2		Electronic systems	900	8	1
SI3		Electric systems	900	6	1
CS	Combined system connexion	-	900	10	1
AC	Addition of small components	-	150	6	1
S	Sealing	-	250	5	1
JB	Joining by bolts	-	225	10	1
D1	Drilling	Manual	300	10	1
D2		Auto	175	2	2,5
C1	Counterboring	Manual	225	10	1
C2		Auto	150	2	0,8
R1	Riveting	Manual	100	12	1
R2		Auto	40	2	0,8
Cn	Connection operation	-	1800	15	1

Tabla 18: valores empíricos de tiempos e incertidumbres asociadas para las actividades simples del PRD definido.

Por tanto, el cálculo de la incertidumbre de los parámetros del modelo, así como de su mismo valor, parte de una información de la que se debe disponer a priori. Dicha información incluye unos tiempos medidos empíricamente para todas las actividades simples definidas en el PRD, bajo unas condiciones definidas, como el número de elementos (se toma 1) y la velocidad del recurso dominante que se empleó para ejecutar la tarea. La Tabla 18 muestra todos los valores medidos para las actividades simples del PRD, junto a su intervalo de confianza y la velocidad del recurso, que viene dada como coeficiente, siendo el valor de 1 el de la velocidad de un recurso de referencia (no necesariamente el usado en la medida).

Además, se debe incluir un intervalo de confianza del 95%, que se determinará aplicando la Ec. 5.5.3 y la Ec. 5.5.4. En la primera, x_i representa una medida del tiempo para una determinada actividad, y $\bar{x}$ la media de las n medidas realizadas. Se recomienda que el tamaño de la muestra no sea menor de 100 medidas para cada actividad. Aplicando la Ec. 5.5.3 se puede obtener una aproximación a la desviación típica, σ , y con ella estimar el valor del intervalo de confianza, suponiendo que el tiempo de las actividades sigue una distribución normal, según la Ec. 5.5.4. En la Tabla 18 aparecen los intervalos de las actividades simples del PRD.

Otro aspecto que se estima conveniente discutir en este apartado es el cálculo de la incertidumbre para parámetros que se calculan como el valor máximo dentro de un conjunto cuyos miembros también tienen incertidumbre asociada. Un ejemplo de parámetro que se calcula como el máximo entre un conjunto de valores es el tiempo de ciclo, TC, cuya fórmula recoge la Ec. 5.5.5, y se ha definido como el máximo tiempo de duración de entre las NST estaciones del proceso.

Sin embargo, nunca se podrá asegurar qué tiempo es el mayor, porque no se trata de valores exactos, sino de esperanzas. Por lo tanto, habrá una probabilidad de que cualquier estación S_s tenga el mayor tiempo de duración. Esta posibilidad se ha denominado $P[S_s \text{MAX}]$, y la Ec. 5.5.6 define matemáticamente su probabilidad. La esperanza e incertidumbre del tiempo de ciclo, $E[TC]$ y UTC respectivamente, se podrán definir en función de dicha probabilidad, tal y como expresan la Ec. 5.5.7 y la Ec. 5.5.8.

$$TC = \text{MAX}_s^{TNS}(T_s) \quad \text{Ec. 5.5.5}$$

$$P[S_s \text{MAX}] = P[s = j, \quad \text{MAX}_j^{TNS}(T_j)] \quad \text{Ec. 5.5.6}$$

$$E[TC] = \sum_{s=1}^{NTS} T_s \cdot P[S_s \text{MAX}] \quad \text{Ec. 5.5.7}$$

$$UTC = \sqrt{\sum_{j=1}^{NTS} (UT_j \cdot P[S_j \text{MAX}])^2} \quad \text{Ec. 5.5.8}$$

Sin embargo, el cálculo de la probabilidad $P[S_s \text{MAX}]$ no es trivial. La probabilidad de que el miembro de un conjunto sea el máximo será igual al producto de las probabilidades de que sea mayor que cada uno de los demás miembros. La probabilidad de que el tiempo de una estación s sea mayor que el de otra j equivale a la probabilidad de que su diferencia sea mayor que 0 (Ec. 5.5.9).

El valor de la diferencia entre los tiempos de esas dos estaciones seguirá una distribución normal, con una esperanza igual a la diferencia entre las esperanzas de los dos valores (Ec. 5.5.10), y una incertidumbre igual a la raíz de la suma de los cuadrados de las incertidumbres (Ec. 5.5.11). Luego la probabilidad de que el tiempo de una estación $t(S_s)$ sea el máximo vendrá dada por el productorio que aparece en la Ec. 5.5.12. Se deberá introducir la probabilidad para cada estación en las ecuaciones Ec. 5.5.7 y Ec. 5.5.8, para la determinación rigurosa de la distribución del tiempo de ciclo, o cualquier otro parámetro que se calcule análogamente.

$$P[T_s > T_t] = P[T_s - T_t > 0] \quad \text{Ec. 5.5.9}$$

$$E[T_s - T_t] = E[T_s] - E[T_t] \quad \text{Ec. 5.5.10}$$

$$U[T_s - T_t] = \sqrt{UT_s^2 + UT_t^2} \quad \text{Ec. 5.5.11}$$

$$P[S_s \text{ MAX}] = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq s}}^{NTS} P \left[N \left(E[T_s] - E[T_t], \sqrt{UT_s^2 + UT_t^2} \right) > 0 \right] \quad \text{Ec. 5.5.12}$$

En el modelo no se ha incluido el razonamiento anterior, sino que se ha realizado una simplificación. Según ella, la incertidumbre del tiempo de ciclo se calcula de una forma más sencilla, como la incertidumbre del tiempo de duración cuya esperanza sea la máxima. La Ec. 5.5.13 muestra la solución adoptada.

$$UTC = UT_s, \quad s = j, \quad \text{MAX}_j^{TNS}(T_j) \quad \text{Ec. 5.5.13}$$

Se ha seguido esta simplificación para lograr mayor rapidez en los cálculos automatizados y también por compatibilidad del modelo. La compatibilidad se puede ver comprometida debido a que, según el modo riguroso de cálculo, algunas estaciones podrían tener un tiempo mayor que el de ciclo, por lo que su tiempo improductivo sería negativo, aunque se podría acotar inferiormente por 0. En cualquier caso, el cálculo de la eficiencia para dichas estaciones no aportaría ninguna información.

En cuanto a la introducción de la incertidumbre en el sistema evaluador, también merece una discusión. Habitualmente, en la literatura se menciona la Lógica Borrosa, entre otras cosas, como una forma de lidiar con la incertidumbre de los datos en la toma de decisiones [73]-[75]. Sin embargo, se estima que dicho método por sí sólo no es suficiente. Se requiere una forma de compatibilizar valores de entrada que tengan una incertidumbre y el proceso de borrosificación, que normalmente requiere magnitudes exactas.

En el método de evaluación final adoptado, se ha recurrido al cálculo integral para la determinación de la pertenencia a subconjuntos borrosos de una variable que siga una distribución normal, con una esperanza y una incertidumbre dadas. De esa forma se consigue introducir ese tipo de datos en un sistema basado en la Lógica Borrosa. La sección 6.2.3.4 describe el razonamiento seguido de forma detallada.

5.5.4 Hipótesis

Para la definición del modelo ha sido necesario, entre otras cosas, la creación de un número de ecuaciones y reglas de cálculo. Todo ello se ha generado sobre la base de unas hipótesis que han facilitado la modelización de un conjunto de fenómenos y elementos estáticos tan complejo como el proceso de montaje de una aeronave. Para una adecuada comprensión de esta parte del modelo, se debe detallar todas las hipótesis seguidas, así como justificarlas.

- *Línea síncrona*

De nuevo, la hipótesis sobre la que se apoya el resto de esta parte del modelo es que se trate de una línea de montaje global síncrona. Hay un único tiempo de ciclo en todo el proceso, y los productos abandonan cada etapa, sea una estación o un trayecto de la red logística, cada vez que transcurre dicho período. Si se observan las ecuaciones de la sección 5.5.5, se puede concluir que el punto de partida es la determinación del tiempo de ciclo, como el máximo tiempo de duración de las estaciones definidas en la línea.

- *El tiempo de ciclo no varía localmente con el aprendizaje*

El tiempo de entrega se calcula, según el modelo, como el producto del tiempo de ciclo y el número de etapas máximo que recorre uno de los productos intermedios. Esto no es rigurosamente exacto si se considera un cambio continuo del tiempo de ciclo, adaptándose según el aprendizaje que hace disminuir la duración de las tareas. En ese caso, al calcular el tiempo de entrega, el número de ciclos en cada tarea sería distinto, ya que el sistema lo ajusta según su posición en la línea (para la primera etapa valdría N , para la segunda $N+1$, etc). Sin embargo, al tratarse del mismo avión, su tiempo de entrega se debería calcular con un mismo valor del número de ciclos para todas las estaciones de su montaje. Por lo tanto el tiempo de ciclo debería ser ligeramente menor para cada etapa del proceso por la que pasara el producto.

No obstante, que el tiempo de ciclo varíe de forma continua no se considera factible en un caso real, debido a que un cambio en el mismo implicaría nuevas condiciones en la definición de la red logística, que podría cambiar. Por ejemplo, puede que se requirieran más vehículos de un medio para lograr la frecuencia deseada. El modelo supone que el tiempo de ciclo puede variar debido al aprendizaje, pero siguiendo escalones discretos. Localmente, para el paso ininterrumpido por el conjunto de etapas del proceso, se considera un único valor del tiempo de ciclo.

- *Costes directos, variables y recurrentes.*

El modelo únicamente incluye el cálculo de costes directos, variables y recurrentes. Los costes indirectos, por su definición, no se pueden vincular a un modelo de costes que se ha definido como totalmente basado en actividades. Los costes que se tienen en consideración están directamente vinculados con la utilización de recursos asignados a actividades que forman parte de la misma línea de montaje, por lo que se pueden considerar de nivel producto. Por tanto, los costes variarán con el tamaño de la serie y se repetirán para cada nueva unidad producida, por lo que son variables y recurrentes, respectivamente.

- *Recursos no compartidos en otros proyectos*

Se considera recurso sólo puede estar asignado a actividades dentro del mismo nodo industrial y que pertenezcan al proyecto correspondiente al montaje que se está definiendo conceptualmente. El tiempo que un recurso no esté siendo usado para la realización de una operación del proyecto se considera improductivo, dado que falta información acerca de los distintos proyectos adicionales que pueden estar asignados a las distintas plantas industriales.

Una posible futura línea de trabajo consistiría en incorporar información acerca de los recursos que se encuentran en uso para otros proyectos en las distintas plantas y el porcentaje del tiempo de ciclo que estaría disponible. De todas formas, esta mejora es compleja: por ejemplo, distintos proyectos en una misma planta no tienen por qué tener el mismo tiempo de ciclo, cuadrar las actividades de uno y otro para poder usar el recurso puede no ser factible. Por ejemplo, podría ser necesario incluir retrasos en actividades de uno y de otro, pero de forma variable con cada nuevo ciclo.

- *Tiempo de actividades sigue una distribución normal*

Se considera que el tiempo para la realización de cualquier actividad del proceso seguirá una distribución Normal o de Gauss. Por tanto tendrá un valor medio y una desviación típica σ . Para las actividades simples, estos valores se inferirán a partir de los datos empíricos. Se considera intervalos de confianza del 95%, por lo que el semi intervalo de incertidumbre será de 1.96 por el valor de σ empleado. Para actividades compuestas la incertidumbre se calcula según la regla de propagación que se detalla en la sección 5.5.3.

- *Costes de transporte sin incertidumbre*

Se considera que los transportes de componentes se ajustan a unos requisitos y optimizan el uso de los recursos. El precio de cada transporte, según se ha establecido, se debe fijar en un principio, por lo que no se ha incluido en el modelo.

- *Incertidumbre de máximos simplificada*

Para el cálculo de los parámetros que se definen como el máximo de un conjunto de valores, se ha decidido seguir un camino sencillo, tomando como la incertidumbre del máximo de los valores la incertidumbre del valor máximo. Siguiendo el enfoque riguroso se obtiene un método de cálculo que, por su complejidad, requiere altos tiempos de procesamiento. Además dicho enfoque puede dar como resultado que algunas estaciones tengan un tiempo mayor que el tiempo de ciclo, lo que puede generar inestabilidad en el modelo.

- *Recursos con amortización constante*

Para el cálculo del coste horario de un recurso se tiene en cuenta su precio de adquisición y su esperanza de vida útil, pero no la depreciación del dinero o del recurso. El resultado es una amortización constante del recurso a lo largo de los años.

5.5.5 Reglas

Tras haber explicado los distintos conceptos cuyos parámetros asociados se evalúan en el sistema, así como el proceso seguido para el cálculo de su valor y diversas consideraciones e hipótesis, en este apartado se incluyen todas las reglas que se han definido para la realización de todos los cálculos necesarios.

Se ha separado el apartado en 4 partes, en las que se detalla, respectivamente, los sistemas definidos para el cálculo de los tiempos, de los costes, de la eficiencia en el uso de los recursos y de las incertidumbres asociadas a todos los anteriores.

5.5.5.1 Cálculo de tiempos

Los parámetros relacionados con el tiempo se calculan según las ecuaciones Ec. 5.5.14 a Ec. 5.5.19. En la primera de ellas se muestra cómo se calcula el tiempo de ciclo, TC, como el máximo tiempo de duración de las estaciones. La Ec. 5.5.15 incluye la forma de calcular el tiempo de duración de una estación o cualquier otra actividad. Ello depende de su número de hijos. Si no los tiene, la duración se estima extrapolando el valor de referencia del PRD para el tipo de actividad simple, ajustándolo según la velocidad del recurso principal finalmente asignado, el número de elementos de la operación y el número de turnos. Se incluye también el coeficiente de aprendizaje KL, calculado según el apartado 5.5.6.

Cuando una estación tiene más de un turno, el tiempo se computa como el cociente del tiempo ordinario entre el número de turnos, pues al trabajar los recursos más tiempo, el resultado al cerrar la jornada será un múltiplo del que se obtiene para un solo turno.

Si la actividad tuviera hijos, la duración se calcularía como el valor máximo del "Tiempo hasta el final" de las primeras actividades hijas (o hijas de Prioridad igual a 1). Se define dicho concepto como el tiempo requerido, dada una actividad, para que se completen todas las actividades posteriores relacionadas con ella mediante restricciones de precedencia. El "Tiempo hasta el final" se calcula de forma recursiva mediante la Ec. 5.5.16, empleando la duración de la propia actividad y el número de actividades sucesoras.

Se debe precisar que, en soluciones en las que se ha completado el paso de desplazar la ejecución de algunas actividades y/o asignar nuevos recursos para evitar incompatibilidades por disponibilidad, la duración de actividades compuestas no se calcula con la Ec. 5.5.15. En esos casos se emplea la funcionalidad de CATIA correspondiente, dado que el programa permite el cálculo instantáneo del tiempo asociado a un diagrama de Gantt modificado.

$$TC = \text{MAX}_i^{TNS}(T_i) \quad \text{Ec. 5.5.14}$$

$$T_i = \begin{cases} TM_i \cdot NE_i \cdot (ST_i/SR1_i)/NH_i, & NC_i = 0 \\ \text{MAX}_p^{NP1_i}(TE_p), & NC_i > 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 5.5.15}$$

$$TE_j = \begin{cases} T_j, & NAS_j = 0 \\ T_j + \text{MAX}_n^{NAS_j}(TE_n), & NAS_j > 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 5.5.16}$$

El tiempo de entrega o tiempo total, TT, se estima mediante la Ec. 5.5.17, multiplicando el tiempo de ciclo y el número de estaciones máximo de las ramas de transportes del nodo principal, o "FAL" (Final Assembly Line). El número máximo de estaciones en ramas, BNS, se calcula de forma recursiva con la Ec. 5.5.18, incluyendo el propio valor de BNS para los distintos nodos conectados, las estaciones posteriores a la entrada de los productos de los mismos y las escalas de los transportes de dichas conexiones. La Ec. 5.5.19 se aplica para cálculos en estados de baja definición de la alternativa.

$$TT = (BNS_f|_{f=FAL}) \cdot TC \quad \text{Ec. 5.5.17}$$

$$BNS_k = \text{MAX}_l^{NP1_k}(NS_{kl} + BNS_l + NoS_l + 1) \quad \text{Ec. 5.5.18}$$

$$BNS_0 = NJ + NT \quad \text{Ec. 5.5.19}$$

La Figura 29 muestra un ejemplo de red, y el cálculo del BNS máximo del FAL se realizaría teniendo en cuenta dicho valor para los otros nodos conectados, a, b y c., las escalas en sus transportes y las estaciones posteriores hasta el final de la línea, como muestra la Ec. 5.5.20.

$$BNS_{FAL} = \text{MAX}\{(3+BNS_a+0+1), (3+BNS_b+0+1), (1+BNS_c+1+1)\} \quad \text{Ec. 5.5.20}$$

Figura 29: número de estaciones, BNS, de las distintas ramas de una red logística.

5.5.5.2 Cálculo de costes

Los distintos valores de costes en el modelo se calculan mediante las ecuaciones Ec. 5.5.21 a Ec. 5.5.25. El coste total, C , se considera la suma de los costes asociados a los NIN nodos industriales definidos (Ec. 5.5.21). El coste asociado a un nodo se calcula de dos formas (Ec. 5.5.22 y Ec. 5.5.25) dependiendo el estado de definición de la solución. En ambos casos se incluye el coste del transporte hasta el nodo siguiente y el coste asociado a la planta seleccionada.

Si aún no se conoce el número y tipo de recursos asignados (Ec. 5.5.22), se suma el coste de cada estación j , que se calcula recursivamente según la Ec. 5.5.23, donde el coste de una determinada actividad o estación viene dado por el tiempo de ciclo y el coste horario de los distintos recursos asignados más los costes de las actividades hijas.

El coste horario se calcula mediante la Ec. 5.5.24, en función de si se trata de un recurso humano o material. En ambos casos se tiene en cuenta el número de turnos, ya que jornadas de más de un turno implican un mayor uso de los recursos y un coste dos o tres veces mayor, en función de dicho número.

El coste horario de un recurso no humano se calcula teniendo en cuenta su esperanza de vida útil y su coste total por amortizar. No se incluye ninguna clase de depreciación del dinero o del recurso, se trata de una amortización constante, como muestra la Ec. 5.5.24. Los recursos humanos tienen un coste horario que coincide con su paga, ajustada a la unidad de tiempo que se emplee. Para los turnos extraordinarios, los trabajadores deben tener asignada una paga mayor.

$$C = \sum_{i=1}^{NI} C_i \quad \text{Ec. 5.5.21}$$

$$C_i = CoT_i + CP_i + \sum_{j=1}^{NS_i} CA_j \quad \text{Ec. 5.5.22}$$

$$CA_k = \sum_{r=1}^{NR_k} TC \cdot CH_r + \sum_{l=1}^{NC_k} CA_l \quad \text{Ec. 5.5.23}$$

$$CH_r = \begin{cases} W_r + (NH - 1) \cdot WE_r, & \text{human resource} \\ NH \cdot CS_r / EL_r, & \text{other case} \end{cases} \quad \text{Ec. 5.5.24}$$

Si los recursos asignados ya están totalmente definidos (se conoce el número definitivo de unidades de cada modelo en la planta), el coste de un nodo industrial i , se calcula mediante la Ec. 5.5.25. El valor corresponde al coste asociado al transporte al siguiente nodo, CoT_i , más el sumatorio de los productos del tiempo de ciclo por el coste horario.

$$C_i = CoT_i + CP_i + \sum_{r=1}^{NR_i} TC \cdot CH_r = CoT_i + CP_i + CnoT_i \quad \text{Ec. 5.5.25}$$

5.5.5.3 Cálculo de la Eficiencia

La eficiencia en el uso de los recursos se calcula mediante la Ec. 5.5.26 y la Ec. 5.5.27. Se calcula como una suma ponderada de las eficiencias en el uso de todos los recursos. La eficiencia de un recurso individual se calcula, según se propone en la Ec. 5.5.26, como la proporción del tiempo que el recurso es utilizado directamente y el tiempo que está asignado al proceso, que se considera coincidente con el tiempo de ciclo (el modelo no incluye recursos compartidos con otros proyectos).

$$E_r = \frac{\sum_{a=1}^{NA_r} T_{ra}}{TC} \quad \text{Ec. 5.5.26}$$

$$E = \sum_{r=1}^{NR} [E_r \cdot CH_r] / \sum_{r=1}^{NR} CH_r \quad \text{Ec. 5.5.27}$$

$$E = \frac{1}{CnoT} \cdot \sum_{r=1}^{NR} \sum_{a=1}^{NA_r} T_{ar} \cdot CH_r \quad \text{Ec. 5.5.28}$$

Para calcular la eficiencia total del uso de recursos en el proceso completo, se realiza una suma ponderada según el coste de cada recurso de las eficiencias individuales. La Ec. 5.5.27 muestra dicha operación. Si se introduce la Ec. 5.5.26 en el denominador para incluir la expresión de la eficiencia de un recurso, se obtiene la fórmula del coste total sin incluir el transporte, CnoT, y la ecuación queda transformada en la Ec. 5.5.28, que es la utilizada en la metodología.

5.5.5.4 Cálculo de la incertidumbre

El cálculo de la incertidumbre requiere la elaboración de una formulación algo más compleja. Las ecuaciones Ec. 5.5.29 a Ec. 5.5.42 recogen la manera que se ha fijado en el modelo de determinar la incertidumbre asociada a los distintos parámetros relativos al tiempo, al coste y a la eficiencia del uso de recursos.

La Ec. 5.5.29 define la incertidumbre del tiempo de ciclo como la incertidumbre del tiempo de la estación del proceso con mayor duración, según la simplificación discutida en el apartado 5.5.3. La incertidumbre del tiempo total se calcula según la Ec. 5.5.30, como el producto del número de estaciones máximo de rama por la incertidumbre del tiempo de ciclo UTC.

La incertidumbre de la duración de una actividad generalizada i , tanto una simple, como una compuesta como una estación, se calcula con la Ec. 5.5.31: si la actividad es simple (no tiene hijos) se calcula empleando el valor de incertidumbre de referencia UTM para esa actividad y un recurso de referencia, incluido todo ello en el PRD, y extrapolando a la velocidad del recurso finalmente asignado, al número de elementos y de turnos de la estación. Si una actividad i tiene hijos, la incertidumbre de su duración viene dada por la denominada incertidumbre del "Tiempo hasta el final" máxima de entre todas las actividades hijas con prioridad 1. La incertidumbre del "Tiempo hasta el final" de una actividad j se calcula con la Ec. 5.5.32, que incluye la incertidumbre de la propia actividad con la del "Tiempo hasta el final" mayor de entre todas las actividades sucesoras directas.

$$UTC = UT_l, \quad l = s, \quad MAX_s^{TNS}(T_s) \quad \text{Ec. 5.5.29}$$

$$UTT = (BNS_f|_{f=FA}) \cdot UTC \quad \text{Ec. 5.5.30}$$

$$UT_i = \begin{cases} UTM_i \cdot NE_i \cdot (ST_i/SR1_i)/NH_i, & NC_i = 0 \\ MAX_p^{NP1_i}(UTE_p), & NC_i > 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 5.5.31}$$

$$UTE_j = \sqrt{UT_j^2 + UTE_k^2}, \quad k = s, \quad MAX_s^{NAS}(TE_s) \quad \text{Ec. 5.5.32}$$

Se define la incertidumbre del coste de una actividad j mediante la Ec. 5.5.33, como la raíz de la suma de los cuadrados de los productos de los costes horarios ajustados de los recursos asignados a la actividad, ajustados según su porcentaje de asignación si son compartidos con otra actividad, y la incertidumbre del tiempo de ciclo.

$$UC_j = UTC \cdot \sqrt{\sum_{r=1}^{NR_j} (CH_r \cdot PS_{rj})^2} \quad \text{Ec. 5.5.33}$$

En cuanto al coste total, si éste es la suma de los costes de los nodos industriales (Ec. 5.5.21), la incertidumbre asociada vendrá dada por la Ec. 5.5.34. El coste de un nodo industrial i (Ec. 5.5.22) se puede expresar como muestra la Ec. 5.5.35, donde CL_i representa los costes logísticos asociados al nodo (por el transporte y el uso de la planta) y $\mathfrak{C}$ un término complejo con los costes horarios de los recursos de la línea. La incertidumbre del coste de un nodo i vendrá dada por la Ec. 5.5.36. Si se considera que el coste logístico no tiene incertidumbre, ya que está pactado, y se despeja el término $\mathfrak{C}$ de la Ec. 5.5.35, se obtiene que la incertidumbre del coste de un nodo industrial i se puede obtener aplicando la Ec. 5.5.37.

$$UC = \sqrt{\sum_{i=1}^{NI} UC_i^2} \quad \text{Ec. 5.5.34}$$

$$C_i = CL_i + TC \cdot \mathfrak{C} \quad \text{Ec. 5.5.35}$$

$$UC_i = \sqrt{CL_i^2 \cdot UCL_i^2 + \mathfrak{C}^2 \cdot UTC^2} \quad \text{Ec. 5.5.36}$$

$$UC_i = \left[\frac{C_i - CL_i}{TC} \right] \cdot UTC \quad \text{Ec. 5.5.37}$$

Se parte de la fórmula recogida en la Ec. 5.5.28 para la eficiencia del uso de los recursos para hallar su incertidumbre. Si se aplica la regla de la propagación del error, la incertidumbre de la eficiencia total se podrá expresar según la Ec. 5.5.38, como la raíz de la suma de los cuadrados de dos términos, A y B, donde A representa el término en el que se incluye la incertidumbre del coste no asociado al transporte (Ec. 5.5.39) y B el que tiene en cuenta las incertidumbres de la duración de las actividades.

Si se opera A, derivando la expresión de la eficiencia respecto al coste, se obtiene el término final de la Ec. 5.5.40, dado que se considera que la incertidumbre del coste de transporte es nula. El término B vendría dado por la Ec. 5.5.41, como la raíz de un sumatorio de productos de los cuadrados de los costes horarios ajustados de los recursos y de las incertidumbres del tiempo de las actividades a las que están asignadas. Por tanto, la incertidumbre total de la eficiencia vendrá dado por la Ec. 5.5.42

$$UE = \sqrt{A^2 + B^2} \quad \text{Ec. 5.5.38}$$

$$A = \frac{\partial E}{\partial CnoT} \cdot UCnoT \quad \text{Ec. 5.5.39}$$

$$A = \frac{-1}{CnoT^2} \cdot \left\{ \sum_{r=1}^{NR} \sum_{a=1}^{NA_r} T_a \cdot CH_r \right\} \cdot UC = \frac{-E}{CnoT} \cdot UC \quad \text{Ec. 5.5.40}$$

$$B = \frac{1}{CnoT} \cdot \sqrt{\sum_{r=1}^{NR} \sum_{a=1}^{NA_r} [UT_a]^2 \cdot [CH_r]^2} \quad \text{Ec. 5.5.41}$$

$$UE = \frac{1}{CnoT} \cdot \sqrt{[E \cdot UC]^2 + \sum_{r=1}^{NR} \sum_{a=1}^{NA_r} [UT_{ar}]^2 \cdot [CH_r]^2} \quad \text{Ec. 5.5.42}$$

5.5.6 Modelo de aprendizaje

Se ha incluido en el sistema el concepto de aprendizaje, que una tarea se termine de forma más rápida según el número de veces que se haya realizado anteriormente. Tradicionalmente, siempre ha ido asociada la fabricación en el sector aeroespacial con la reducción de tiempos por aprendizaje. De hecho, se observó el fenómeno por primera vez en proyectos de montaje de aeronaves de la fuerza aérea estadounidense [91][94].

Para la elaboración de un modelo adecuado de aprendizaje, se ha realizado una revisión previa de la literatura que ha proporcionado una perspectiva de los principales enfoques y direcciones de desarrollo existentes en la literatura. La sección 2.7 recoge dicha revisión.

Un modelo de aprendizaje se define mediante la ecuación de la denominada curva de aprendizaje, que relaciona el tiempo o el coste de una tarea con el número de veces que se ha repetido anteriormente. El tipo de curva más habitual es el logarítmico-lineal, al que la Ec. 5.5.43 pertenece [91]-[94]. En la metodología se ha adoptado ese tipo de modelo. Los parámetros T_N , T_S , N y LCI representan el tiempo para un número de repetición; el tiempo estándar (un valor de referencia medido); el número de repeticiones hasta el momento y el coeficiente de aprendizaje, respectivamente.

	Type/Variant	Time 1000 repeats	LCI
Generic	Manual	600	0.975
	Auto	500	0.975
Positioning at jig	Moving	1500	0.975
	Base component	3000	0.923
	Added component	2250	0.923
	Structure alignment	900	0.975
	Structural continuity	900	0.975
	Mechanical tests	900	0.975
Testing	Neumatic and fluids systems	1500	0.975
	Electronic systems	900	0.975
	Electric systems	900	0.975
	Set of systems	4500	0.975
	Dimenssion measurement	300	0.975
System installation	Nesting	600	0.975
	Neumatic and fluids systems	900	0.936
	Electronic systems	900	0.936
	Electric systems	900	0.936
	Combined system connexion	900	0.975
Addition of small components		150	0.975
Sealing		250	0.975
Joining by bolts		225	0.975
Drilling	Manual	300	0.906
	Auto	175	0.998
Counterboring	Manual	225	0.967
	Auto	150	0.998
Riveting	Manual	100	0.975
	Auto	40	0.998
Connection operation		1800	0.975

Tabla 19: valores del coeficiente de aprendizaje, LCI, para los tipos de actividades simples del diccionario PRD definido para los casos de estudio.

El valor del tiempo, T_N , según la Ec. 5.5.43, tiende a 0 cuando el número de repeticiones tiende a infinito. Por ello, en algunos modelos se ha introducido una variación en la curva de aprendizaje, como ocurre en la Ec. 5.5.44. En ese caso, el valor de la asíntota horizontal sería distinto de 0 [91].

$$T_N = T_S \cdot k \cdot [LCI]^{\log_2 N} \quad \text{Ec. 5.5.43}$$

$$T_N = T_S \cdot [1 + k' \cdot [LCI]^{\log_2 N}] \quad \text{Ec. 5.5.44}$$

En la Ec. 5.5.44 se evita, por tanto, que el tiempo tienda a un valor nulo, pero la fórmula impone que el valor de referencia del tiempo, T_S , corresponda al valor límite, es decir, el tiempo que se tardaría en completar la tarea cuando el número de repeticiones tiende a infinito (o es lo suficientemente alto). La Ec. 5.5.45 muestra el cálculo de dicho valor de forma justificada.

$$\lim_{N \rightarrow \infty} T_S \cdot [1 + k' \cdot [LCI]^{\log_2 N}] = T_S + k' \cdot T_S \cdot \lim_{N \rightarrow \infty} [LCI]^{\log_2 N} \xrightarrow{LCI < 1} \lim_{N \rightarrow \infty} T_N = T_S \quad \text{Ec. 5.5.45}$$

La elección de la variante representada en la Ec. 5.5.44 se valoró para que el modelo fuera más realista, pero finalmente se descartó debido a que en ese caso los tiempos de referencia deberán ser los valores que se estime que son los límites que acoten superiormente el tiempo de finalización de cada tarea. Se considera que la determinación de dichos valores puede ser problemática y ello puede constituir una fuente de error. Finalmente se eligió el perfil de la Ec. 5.5.43, con un tiempo de referencia, T_S , medido para un número de repeticiones igual a 1000. La Tabla 19 muestra dichos tiempos, así como el coeficiente LCI de las actividades del diccionario PRD empleado en los casos de estudio.

$$k = 1/[LCI]^{\log_2 1000} \quad \text{Ec. 5.5.46}$$

La constante k se incluye para ajustar el modelo según la referencia tomada. Si se despeja su valor de la Ec. 5.5.43 teniendo en cuenta que se toma para 1000 repeticiones, se obtiene la expresión de la Ec. 5.5.48. Si se sustituye en la Ec. 5.5.43, se obtiene la Ec. 5.5.48. Ésa es la expresión que finalmente se ha utilizado para el cálculo de los tiempos.

$$T_N = T_S \cdot [LCI]^{\log_2 (N/1000)} \quad \text{Ec. 5.5.47}$$

$$K_L = [LCI]^{\log_2 (N/1000)} \quad \text{Ec. 5.5.48}$$

Únicamente se tiene en cuenta de forma directa el aprendizaje en actividades simples, es decir, que no están compuestas por un número de actividades hijas. En la Tabla 19 se muestra los valores de los tiempos de referencia que se han empleado en el diccionario PRD definido para la ejecución de los casos de estudio del 0. En proyectos reales dichos valores se deberían determinar realizando mediciones. Además, el modelo de cálculo incluye una incertidumbre asociada a todos los tiempos de referencia. La inclusión de la incertidumbre en el modelo se detalla en la sección 5.5.3.

Por último se debe especificar que el número de repeticiones no coincide con el número de unidades producidas, dado que las distintas tareas se repiten para un número de elementos, que viene dado como propiedad de la unión asociada. Además, se considera que en los primeros ciclos de producción, las estaciones finales aún no se han iniciado. Es decir, en el primer ciclo únicamente hay actividad en las primeras estaciones de los primeros nodos industriales; en el segundo, habrá actividad en ellas y en las estaciones siguientes, y así sucesivamente.

5.6 Hipótesis generales

Para terminar, se estima adecuado recopilar todas las hipótesis que se han seguido en el desarrollo del modelo descrito. La explicación de las mismas se ha incluido previamente, en la sección 5.4.3.1 (hipótesis novena a decimo cuarta), en la sección 5.5.4 (primera a séptima) y en la sección 5.5.6 (octava)

- Línea síncrona.
- El tiempo de ciclo no varía localmente con el aprendizaje.
- Costes directos, variables y recurrentes.
- Recursos no compartidos en otros proyectos.
- Costes de transporte sin incertidumbre.
- Incertidumbre de máximos simplificada.
- Recursos con amortización constante.
- Modelo de aprendizaje logarítmico-exponencial.
- Transporte del mismo producto.
- Velocidad media.
- Responsabilidad de los transportes.
- Coste horario de la ida.
- Restricciones por el peso.
- Número de vehículos ilimitado.

Capítulo 6

Métodos empleados

Se ha dedicado el capítulo a explicar los métodos numéricos que se han definido para cubrir ciertos aspectos de la metodología. Los procedimientos definidos siguen en la mayoría de los casos algoritmos de creación propia, y se incluirán en el Capítulo 7, que describe todo el proceso que sigue la metodología. Sin embargo, algunos de los pasos han requerido la adaptación de métodos ya existentes.

La Optimización de Colonia de Hormigas (ACO) es un procedimiento meta heurístico que se diseñó para resolver problemas de optimización combinatoria, como se considera a la definición automática de la red logística. La Teoría de la Lógica Borrosa (FL) consiste en la utilización de reglas capturadas mediante lenguaje natural y poco precisas para obtener evaluaciones según varios criterios. Ambos métodos se detallan en este capítulo, justificando su elección y explicando en detalle la manera en que se han adaptado para la metodología.

6.1 Optimización de Colonia de Hormigas (ACO) para la Distribución Logística

Esta primera parte del capítulo se ha dedicado al método desarrollado para la parte de la metodología que se enfoca en la definición de la red logística. Se trata de describir el enfoque del problema y el método desarrollado para su resolución. Dado que lo que se propone es una metodología, no se busca resolver una instancia dada del problema, sino plantear una forma de resolver cualquier instancia que se pueda plantear

Como se discutió en la sección 5.4, se entiende la red logística como un conjunto de nodos unidos entre sí por relaciones de transporte. Cada una de ellas denota que un sub montaje del producto debe transportarse de uno de los nodos relacionados al otro. Todos los nodos se encuentran conectados, según la estructura de montaje del producto. Existen nodos de tipo origen, de los cuáles parte un componente individual, y nodos industriales, dentro de los cuales se ejecuta un proceso de montaje entre los subconjuntos de entrada, lo que genera un subconjunto mayor de salida.

Para la modelización descrita de la red logística, el problema de definición de la misma consistirá, sencillamente, en la elección de las localizaciones de los distintos nodos involucrados y de los medios para cubrir las necesidades de transporte de componentes en la red.

La obtención de la mejor solución puede parecer un procedimiento sencillo, dado el carácter discreto del problema. Sin embargo, si se considera el número de alternativas y la evolución de dicha cantidad si se aumenta el número de elementos del problema (o número de nodos o de localizaciones disponibles), se concluirá que es de tipo NP [36][37], por lo que los métodos exactos son inviables para el caso general, mientras que los de clase meta heurística proporcionan buenos resultados en problemas de este tipo [38][40]-[42].

De entre los métodos meta heurísticos existentes, se ha seleccionado el tipo ACO, por sus aplicaciones exitosas a problemas similares en la literatura [38][40][47][49][50]-[53] y ventajas que aporta, como su facilidad de implementación, su alta componente relativa a la exploración de posibilidades y el aspecto de aprendizaje del sistema a partir de la experiencia.

Tanto el método ACO como la variante finalmente utilizada han sido previamente desarrollados por otros autores. Sin embargo ello define únicamente la estructura más básica del método. La modelización del problema, la definición de restricciones, la creación de las funciones a optimizar y el algoritmo final son una aportación de la presente tesis.

6.1.1 El problema de la Definición de la Distribución Logística

Esta parte de la metodología tiene como objetivo definir la Distribución Logística de la producción. En primer lugar se debe especificar de forma detallada el problema que se busca solucionar. La cadena de suministro es un concepto muy amplio que implica diversos aspectos del ciclo de vida del producto. Uno de los objetivos que se persigue es encontrar una solución óptima para definir una parte específica, acotada de dicha cadena. Al emplear el término red logística, se hace referencia a este enfoque.

6.1.1.1 Descripción del problema

Se considera, como se describe en la sección 5.4, la red de distribución o cadena logística un conjunto de nodos entre los que se transportan los componentes o sub montajes. En cada nodo se ejecuta un proceso de montaje, tiene como entradas varios sub montajes intermedios y como salida un producto intermedio resultante, que deberá ser transportado hasta el siguiente nodo.

Por tanto, la definición de esta red incluye las siguientes tareas: selección de una planta para cada uno de los nodos industriales ya definidos, selección de un medio para el transporte de los componentes necesarios y elección, en los casos en que existan varias posibilidades, de las instalaciones donde se producen las piezas individuales. Se considera que una solución es factible si cumple con las restricciones definidas en el modelo.

El problema es aplicable tanto si la empresa controla la fabricación y transporte de todos los componentes como si sólo ejecuta un subconjunto de estos trabajos, puesto que en ambos casos la localización de los nodos de la red y la selección del transporte tendrán repercusiones sobre el coste y el tiempo.

Figura 30: correspondencia entre la vista As Planned y la red de distribución

La información de partida que define cada caso particular del problema proviene de distintas fuentes. El número de nodos industriales y su conjunto de relaciones de precedencia, así como los productos intermedios de entrada y salida de cada uno, viene todo ello dado por la estructura de la vista As Planned del producto. Cada sub montaje de dicha estructura tiene asociado un nodo industrial para su ensamblado, el sub montaje mismo será el producto de salida y sus componentes serán los de entrada. Además, el producto saliente será una de las entradas del siguiente nodo industrial y se incluye en el modelo los nodos origen de los componentes individuales. La Figura 30 muestra la correspondencia entre ambas estructuras. Cada nodo separado implica, una operación de transporte de componentes, con un medio determinado y un número de unidades transportables en cada viaje.

Las características de cada planta industrial disponible, junto con su ubicación, así como las características de los distintos medios de transporte disponibles, están incluidas en la sección de modelos de recursos del PRD. También se requiere información acerca de la distancia (o el tiempo necesario para recorrerla) entre las distintas localizaciones disponibles. Esta distancia debe estar adaptada para cada medio de transporte: no se trata de la misma distancia si se recorre por carretera que si se trata de transporte aéreo o una ruta marítima entre dos ciudades portuarias. Es imprescindible una tabla de distancias particularizada según los medios disponibles, que deberá estar incluida como parte de la información inicial del sistema.

6.1.1.2 Consideraciones para la resolución matemática del problema

A priori, la definición de la red de distribución con el modelo que se propone puede parecer sencilla, dado que únicamente se trata de elegir las localizaciones de unos nodos industriales ya establecidos y el medio de transporte entre ellas. Sin embargo, el grado de complejidad aumenta si se tiene en cuenta todas las restricciones presentes en el modelo. Por ejemplo, no todas las plantas disponibles pueden ser seleccionadas para cualquier nodo industrial, pues los procesos y productos involucrados imponen unos requisitos, como una altura mínima de la nave industrial o una superficie disponible mínima para la línea de montaje. Asimismo, cada medio de transporte tendrá una capacidad determinada, por lo que algunos productos intermedios no podrán ser transportados por todos los medios y algunos medios podrán transportar más de una unidad de un determinado producto intermedio.

Aún así, la generación de una solución factible puede ser algo relativamente sencillo si las restricciones mencionadas se incluyen como reglas en el sistema. De esa forma un usuario, o bien el sistema de forma automática, podría ir definiendo la solución tomando decisiones para las que sólo se mostrasen las opciones factibles [38][40]. En ese caso surgen distintas dudas: ¿qué calidad tiene esa solución? ¿Hasta qué punto sería mejorable? La solución en sí se puede evaluar, pero no se puede conocer cómo de alejada está de la solución óptima.

Para obtener soluciones de calidad se hace necesario un proceso de optimización. Al tratarse de un problema combinatorio, la manera más sencilla consiste en evaluar todas las posibilidades y seleccionar aquella o aquellas con los mejores resultados según el criterio elegido. Es en ese punto donde se pone de manifiesto la complejidad del problema.

Una dificultad que se puede presentar al resolver estos problemas es lo que se denomina explosión combinatoria. Dado que se desea examinar las soluciones posibles, se puede dar el caso de que para problemas lo bastante grandes el número de posibilidades aumente de forma que el tiempo requerido para que una computadora las procese todas sea inasumible [36]. La existencia de esta posibilidad tiene que ver con el tipo de problema, principalmente con la forma en que crece el número de soluciones con el número de elementos del problema. Se denominan problemas de tiempo No Polinómico (problemas NP) a aquéllos cuyo número de soluciones aumenta a un ritmo superior al de una función polinómica de la variable tiempo [36][38].

6.1.1.3 Problemas NP, el Problema del Viajante y el Problema IPTP

Un ejemplo típico de problema NP es el denominado Problema del Viajante (Travelling Salesman Problem o TSP). Consiste en, dado un conjunto de ciudades separadas geográficamente, encontrar la forma más corta de pasar por todas ellas una vez y retornar al punto de partida [38][40]-[43]. En ese caso el número de soluciones aumenta de forma factorial con el número de ciudades, con lo que el tiempo de resolución puede aumentar rápidamente. A continuación se plantea un ejemplo de cómo los métodos basados en comprobar todas las soluciones no se pueden emplear en todos los casos.

Si, por ejemplo, se consigue resolver de forma exacta el problema para 50 ciudades en un tiempo de procesamiento de 1 segundo, para 51 ciudades se tardaría 51 segundos en resolverlo, mientras que para 52 se tardarían 2652 segundos (unos 44 minutos); y para el caso de 60 ciudades, el tiempo necesario aumentaría hasta más de 8000 millones de años. Por fortuna, existen métodos que permiten obtener soluciones cercanas al óptimo en problemas NP[38]-[43].

Por lo tanto, es necesario plantear: ¿la definición de la red de distribución es un problema NP? Mediante un sencillo cálculo se puede determinar el número de soluciones del problema planteado. La Ec. 6.1.1 calcula el número de soluciones del problema en función del número de nodos industriales (N_{IN}), del número de plantas o localizaciones disponibles (N_{locs}) y del número de medios de transporte (N_{means}).

$$N_{sols} = [N_{locs}^{N_{IN}}] \cdot [(N_{means})^{(N_{IN}-1)}] \quad \text{Ec. 6.1.1}$$

Teniendo en cuenta la Ec. 6.1.1, de tipo exponencial con el número de nodos industriales, queda demostrado que el problema de la definición de la distribución, tal y como se ha planteado, es de tipo NP. Además, se debe tener muy en cuenta dado que cada caso particular tiene una estructura As Planned distinta, con un número de nodos industriales variable.

Si el problema planteado se formula de la manera adecuada, se puede comprobar que se trata de una generalización del TSP. Intuitivamente, basta con imaginar un avión que va recorriendo las distintas localizaciones mientras se le van añadiendo piezas en lugar de un viajante. Si se generaliza la Ec. 6.1.1 para tener en cuenta las restricciones para las soluciones factibles, se obtiene la Ec. 6.1.2, en la que $N_{fe\_locs}^i$ representa el número de plantas disponibles en las que es factible localizar el nodo industrial i , $N_{fe\_means}^{i+1}$ representa el número de medios factibles para ejecutar el transporte entre el nodo i y el siguiente.

$$N_{sols} = \prod_{i=1}^{N_{IN}} N_{fe\_locs}^i \cdot \prod_{i=1}^{N_{IN}-1} N_{fe\_means}^{i,i+1} \quad \text{Ec. 6.1.2}$$

Si se particulariza la Ec. 6.1.2 incluyendo que el número de nodos industriales y localizaciones posibles coincide, que una localización deja de ser factible únicamente cuando ya se ha elegido anteriormente, que únicamente existe un medio de transporte disponible y que la última localización coincide con la primera (ecuaciones Ec. 6.1.3 a Ec. 6.1.6, donde L_f y L_c son el conjunto de localizaciones factibles del nodo i y el de las localizaciones seleccionadas), se obtiene que el número de soluciones coincide con el factorial del número de localizaciones, es decir es el mismo que para el caso del TSP.

$$N_{IN} = N_{locs} \quad \text{Ec. 6.1.3}$$

$$L_f^i \wedge L_c = \emptyset \quad \forall i \quad \text{Ec. 6.1.4}$$

$$N_{fe\_means}^{i,i+1} = 1 \quad \forall i \quad \text{Ec. 6.1.5}$$

$$Loc_{N_{IN}} = Loc_1 \quad \text{Ec. 6.1.6}$$

De la misma forma si en el problema de la distribución se particulariza que en cada nodo industrial sólo existe una entrada (no se añaden nuevos componentes al producto), además de la información recogida en las ecuaciones Ec. 6.1.3 a Ec. 6.1.6, el problema resultante coincide exactamente con el TSP.

Otra diferencia con el TSP radica en que las distancias del problema de la distribución no se calculan con la fórmula de la distancia euclídea, como en el primero. En este caso, las distancias vienen dadas en una tabla, y dependen del medio de transporte. Para generalizar, se puede establecer que la distancia entre dos nodos se define como la longitud de la curva seleccionada para unirlos entre las posibles (cada medio de transporte seguirá una curva distinta para unir el origen con el destino). Así, se puede considerar el TSP una particularización en la que únicamente existen rectas para unir los distintos nodos. Con todo lo anterior, se considera demostrado que el problema modelizado es una generalización del TSP.

No obstante, a pesar de las diferencias con el TSP, el problema planteado, al ser una generalización, sigue considerándose una variante del mismo. Dentro de los problemas NP, se ha demostrado que el TSP entra dentro de la categoría de NP-Hard. Ello implica que cualquier variante que sea NP se debe poder resolver con un algoritmo que funcione para resolverlo [36].

Por último, en la literatura revisada no se ha encontrado ningún problema de optimización equivalente al planteado. Lo más parecido es una variante al problema de Trazado de Rutas de Vehículos (VRP), denominado VRP para Múltiples Depósitos (MDVRP) y utilizado para modelizar una aproximación conjunta de la organización de la producción en factorías y del reparto de los productos [44]. El problema que aquí se formula para la definición de la distribución, se ha bautizado de forma provisional con el nombre de Problema del Transporte del Producto Incompleto (Incomplete Product Transport Problem o IPTP).

Como conclusiones de este apartado, se propone lo siguiente:

- El problema IPTP es de tipo NP
- El problema IPTP es una generalización del problema TSP

6.1.1.4 Formas de resolución

Al diseñar la metodología, se valoró si el usuario debía seleccionar manualmente las localizaciones en las que se ejecutaría cada etapa del montaje, la forma de transportar el producto entre ellas o ambas tareas.

Si se planteó la ejecución de este paso de forma manual fue debido a que cabía la posibilidad de que para ciertos casos el usuario tuviera preferencias no introducidas en el sistema en cuanto a la elección de plantas o medios de transporte. A ello se une el hecho de que para los casos en los que el número de nodos industriales es bajo y existen suficientes restricciones, las opciones disponibles en cada decisión así como el número de decisiones mismos se reduce notablemente. Por ello, un usuario podría definir totalmente la distribución manteniendo una visión global. Sin embargo, esto no es válido para todos los casos.

Si, por el contrario, se implementaba una definición automática de la distribución, se garantizaba una calidad mínima de las soluciones y se eliminaba la necesidad de que el usuario estuviera obligado a probar las distintas alternativas y evaluarlas hasta encontrar una que obtuviera resultados aceptables. La contrapartida es que se perdería el control de un número de decisiones que se consideran estratégicas para la industrialización del producto.

La manera que finalmente se adoptó fue una mezcla de ambas opciones. Además de ciertas restricciones de partida (por ejemplo algunas plantas sólo sirven como origen de ciertos componentes individuales), el usuario puede fijar la localización de nodos industriales o el transporte en los trayectos que desee. El proceso de optimización automático tendrá en

cuenta los aspectos del problema ya fijados por el usuario con antelación. Tras el proceso automático, de nuevo el usuario puede introducir cambios manualmente.

Por tanto, se ha requerido un método de optimización para problemas combinatorios de tipo NP. En el próximo apartado se describen los métodos hallados en la bibliografía para resolver este tipo de problemas, así como el seleccionado y sus variantes.

6.1.2 Resolución de problemas NP

Como se ha argumentado en el apartado anterior, los problemas de optimización combinatoria sólo se pueden resolver de forma exacta procesando todas las alternativas posibles y eligiendo la óptima. Sin embargo, los problemas de tipo NP presentan un número de posibilidades que puede crecer con la dimensión del problema hasta hacer que sea inasumible chequearlas todas [36]-[38][40]. En esos casos, únicamente existen los métodos aproximados para obtener soluciones cercanas al óptimo con un coste computacional relativamente bajo [38][40]-[42]. La mayoría de estos métodos se consideran dentro de la categoría de Heurísticos o Meta Heurísticos.

6.1.2.1 Métodos Heurísticos y Meta Heurísticos

La palabra heurístico hace referencia al conocimiento obtenido a través de la experiencia. Dentro de los métodos aproximados para problemas de optimización combinatoria, los heurísticos son aquéllos en los que se define una solución factible del problema mediante una secuencia de decisiones. Normalmente se basan en criterios que únicamente tienen en cuenta los componentes de la solución más cercanos a la decisión actual, no pueden valorar la solución completa puesto que ésta no existe aún. Se denomina una valoración miope [37][38][40]. Los métodos heurísticos por sí solos tienen como desventajas que sólo hacen un recorrido muy limitado por el espacio de soluciones y que no garantizan la obtención de soluciones de calidad, en el mejor de los casos pueden conducir a un óptimo local [38][40].

Los métodos meta heurísticos suponen un salto cualitativo respecto a los anteriores. Simplificando, se podría decir que en su mayoría se basan en la ejecución repetida de un método Heurístico para obtener soluciones factibles del problema. Cada solución encontrada es evaluada globalmente y eso sirve de retro alimentación para futuras repeticiones de la ejecución heurística. Suponen una mejora significativa en cuanto a la calidad media de las soluciones obtenidas tras su aplicación. Una posible razón es que permiten una exploración efectiva de todo el espacio de soluciones [36]-[38][40].

6.1.2.2 Métodos basados en instancias y basados en modelos

Existen diversos métodos meta heurísticos desarrollados para una gran variedad de problemas de optimización combinatoria. A su vez, se pueden clasificar en métodos basados en instancias y métodos basados en modelos. Los primeros se caracterizan porque parten de una solución o población de soluciones inicial, y las cruzan o modifican de forma que se obtienen nuevas soluciones de calidad progresivamente mayor [38].

El Algoritmo Genético pertenece a la clase basada en instancias. El método consiste en obtener nuevas soluciones a partir de un conjunto inicial dado, empleando operaciones inspiradas en la genética, como selección, cruce y mutación. Una solución debe estar modelizada como una cadena de bits, de forma análoga a una cadena de ADN [38][45]. De esa forma se puede lograr una nueva solución o cadena a partir de dos anteriores, empleando bits de ambas para formar la nueva cadena.

Los métodos basados en modelos, a su vez, generan nuevas soluciones de forma constructiva. Para ello se requiere un modelo probabilístico parametrizado que pueda generar soluciones nuevas, y sus parámetros van siendo actualizados según los resultados obtenidos en soluciones previas.

Un ejemplo de esta clase es el Ascenso de Gradiente Estocástico (SGA). La idea básica que sigue este algoritmo es la de partir de una solución del espacio de soluciones y sumarle un vector con dimensiones coherentes a dicho espacio para encontrar una nueva solución. El vector sigue la dirección del gradiente de la función que se busca optimizar, luego siempre se obtendrá una solución más próxima a un óptimo local, al menos hasta que se alcance las proximidades de dicho punto. El gradiente requiere una generalización del espacio de soluciones en otro, mayor y continuo que lo contenga [38][40].

El método de la Entropía de Cruce se basa también en esta generalización del espacio de soluciones. En este caso se generan distribuciones de probabilidad que representan nuevas soluciones a partir de una inicial [38]. Existen otros ejemplos de algoritmos Meta Heurísticos, como Redes Neuronales (NN), Templado Simulado (SA), Mapa Auto Organizado (SOM) o la Optimización de Colonia de Hormigas (ACO).

Tras una revisión de trabajos previos finalmente se ha adoptado este último, el ACO, como método de optimización. A continuación se justificará dicha elección con las ventajas que ofrece el método y diversas comparaciones con otros métodos para la resolución de problemas concretos.

6.1.2.3 Justificación de elección del algoritmo ACO

En primer lugar, se ha elegido implementar el algoritmo ACO debido a que se ha aplicado en numerosas ocasiones al TSP [42][43] y a problemas combinatorios de planificación de procesos, distribución de la producción y gestión de la cadena de suministro que eran variantes del mismo [44][46][47][49][50][52][54][65][66]. Al ser el TSP un problema NP-Hard, un método que sirva para resolverlo también tendrá aplicación sobre sus variantes [36][37], como el IPTP.

Además, en la literatura se han encontrado diversas ventajas de la aplicación de algoritmos ACO a problemas de combinatoria. En primer lugar el carácter heurístico del método, hace que progresivamente se vaya guiando la búsqueda hacia las soluciones de mayor calidad, o al menos las más prometedoras. Se trata de una forma de aprendizaje del sistema a través de la experiencia [40][41].

Por otro lado, la componente estocástica del método implica que una mayor variedad de posibilidades son exploradas. De esa forma se evita que únicamente se obtengan soluciones correspondientes a óptimos locales [41]-[43].

Otra ventaja importante es que el algoritmo ACO se puede aplicar a cualquier problema de optimización discreta donde se pueda elaborar un mecanismo adecuado de construcción de soluciones. Como se verá más adelante, está muy relacionado con la representación del problema. Un modelo de problema dado, deberá tener un espacio de búsqueda abarcable mediante un conjunto finito de decisiones, y una función objetivo para ser optimizada y que permita evaluar cada solución [40].

Para justificar de forma exhaustiva la elección de un algoritmo frente a los otros, se debería hacer un estudio completo acerca de cada uno, y comparar implementaciones de cada uno. Sin embargo, eso queda fuera del alcance de esta tesis. En su lugar se ha revisado publicaciones en las que se compara el método seleccionado con otros existentes para diversas aplicaciones.

6.1.2.4 Estudios comparativos del algoritmo ACO con otros métodos

Para la resolución del TSP, Dorigo, creador del método, establece que la versión más sencilla del mismo no es competitiva frente a métodos diseñados específicamente para dicho problema y otros meta heurísticos [40]. Sin embargo, se ha desarrollado un gran número de mejoras para el algoritmo ACO que mejoran su desempeño así como los resultados de su aplicación.

El mismo autor compara las actuaciones de una selección de métodos heurísticos y meta heurísticos con la de una mejora del ACO original, denominado Sistema de Colonia de Hormigas (ACS), que se detallará más adelante. El estudio se efectúa con distintas instancias del TSP, en las que varía la localización y el número de ciudades. Se concluye que en los casos estudiados la aplicación del ACS obtiene resultados mejores que los algoritmos SA, NN y SOM; y resultados similares aunque ligeramente superiores que el método GA [42].

Saenphon et al. estudiaron la actuación de varios métodos meta heurísticos mixtos para resolver el TSP. Sus resultados muestran que con una probabilidad del 95%, la combinación propuesta del ACO con la Búsqueda Rápida Del Gradiente Opuesto (FOG), una variante del SGA, obtenía mejores resultados que la combinación entre la Optimización De La Nube De Partículas (PSO) y la Búsqueda Tabú (TS) y mejores que la combinación entre PSO y el mismo ACO. No se halla evidencia de que el método propuesto mejore la actuación de la combinación de GA y PSO aunque los resultados obtenidos apuntan en esa dirección [46].

Liao et al. plantean un problema distinto al TSP, compuesto de dos fases para, respectivamente, definir la cadena de suministro y planificar la producción. Se compara los resultados que obtiene el ACO con un desarrollo previo que implementaba el método GA. Se consiguen mejores resultados con el primero, con ciertas modificaciones para evitar una convergencia prematura de las soluciones[47].

Finalmente, para terminar de apoyar el argumento de la elección del algoritmo ACO, se estima oportuno citar ejemplos de implementaciones del mismo para la resolución de problemas de ingeniería de producción y diseño de la industrialización.

En cuanto a la optimización de aspectos de la cadena de suministro, Moncayo-Martínez et al. han aplicado un método de clase ACO para la definición de la cadena de suministro, optimizando el tiempo de entrega y el coste de bienes vendidos [56]. Nia et al., por su parte, emplean un algoritmo ACO resolver su enfoque de la definición de la cadena de suministro, según la idea de Inventarios Gestionados por Vendedores [62]. Más centrado en la planificación integrada de la distribución con la producción, el planteamiento de Calvete et al. también emplean un algoritmo de tipo ACO [44]. Cheng et al. aplican el método también a la planificación integrada de la producción y la distribución, con una ejecución en dos pasos [63].

Este método también se ha implementado para resolver problemas relativos a la planificación de procesos. Wang et al. han desarrollado un método ACO para la planificación del montaje [61]. Wang et al., por su parte, lo han aplicado a la planificación y programación integradas de procesos, optimizando un modelo con grafos “AND” y “OR” del sistema [50].

Liao et al., Tavares et al. y Guo et al.[47][66][68] han publicado trabajos acerca de la utilización de métodos de tipo ACO, con algoritmos en dos etapas, para la optimización de aspectos relacionados con la planificación, la programación de procesos y el enfoque conjunto de ambas.

Una vez justificada la selección del método ACO con el apoyo de estudios y trabajos previos, se debe explicar el funcionamiento del mismo. A continuación, se expone su idea básica, la estructura en el caso más sencillo y sus posibles variantes.

Figura 31: representación del comportamiento de una colonia de hormigas para encontrar alimento.

6.1.3 La Optimización de Colonia de Hormigas ó ACO

En este capítulo se ha presentado el problema que se busca resolver mediante esta parte de la metodología. Ello deriva del enfoque propuesto para la definición de la red logística. Dicho problema se ha caracterizado matemáticamente. Se ha expuesto los tipos de métodos empleados para abordar problemas de esta clase y se ha justificado la elección de algoritmos de tipo ACO entre todos ellos.

En la próxima sección se explicará los principios fundamentales, el funcionamiento básico, los posibles inconvenientes que plantea y las variantes que existen para su mejora y empleo en diferentes problemas.

6.1.3.1 Idea básica del método

El algoritmo de Optimización De Colonia De Hormigas se basa en el comportamiento social observado en grupos de hormigas para encontrar fuentes de alimento y determinar el camino más corto hasta las mismas [41]-[43].

Tras estudiar a estos insectos, los entomólogos llegaron a la conclusión de que la colonia encontraba el camino más eficiente a través de la experiencia combinada de muchos individuos, gracias a un rastro de feromonas que cada uno de ellos dejaba a su paso. Cada hormiga tiende a seguir el camino donde percibe un mayor rastro de feromonas o bien, si no existe aún ninguno suficientemente fuerte o de forma excepcional, explora en otras direcciones [48].

Un rastro de feromonas se puede fortalecer por diversas razones. Si una hormiga tiene éxito y vuelve con alimento, eso supondrá un doble rastro por ese camino. Si un camino está siendo elegido por muchas hormigas, cada una de ellas estará contribuyendo a su fortalecimiento. Asimismo, un rastro que no se siga con cierta frecuencia irá debilitándose, dado que las feromonas irán paulatinamente evaporándose [41][42]. El resultado es que las rutas más frecuentadas son las que se han probado más eficientes. En la Figura 31 se observa que los caminos A, B y C tienen mayor seguimiento en función de su adecuación.

Tras haberse completado cierto número de trayectos, se puede deducir que se determina un camino altamente eficiente hasta una fuente de alimento. Y con el tiempo suficiente probablemente será el único camino seguido. De esta forma, a través de la suma de mucha información obtenida por la experiencia, se determina lo que se puede considerar una solución de alta calidad.

Esta idea se ajusta de forma fiel, como resulta intuitivo, a la resolución del problema TSP, en cuanto a que el objetivo, si se quiere evitar la explosión combinatoria, es encontrar el camino óptimo sin tener que explorar el total de posibilidades existentes. A continuación se expone el algoritmo desarrollado por Dorigo según esta idea [41].

6.1.3.2 Estructura estándar del método

Como se ha planteado, la premisa es simular el trayecto de hormigas, que van definiendo caminos basándose, o bien en la exploración del medio, o bien en la experiencia de otras hormigas a través de rastros de feromonas. Cada hormiga simulada será, en el algoritmo, una repetición la secuencia que conduce a la generación de una solución factible. En adelante se hablará de hormigas artificiales.

Un aspecto fundamental del método es, por tanto, el de la construcción de soluciones factibles. Ello se consigue a través de la toma de decisiones, siguiendo una secuencia preestablecida. En el caso del TSP, la secuencia es evidente, sería equivalente a: "Elegir ciudad 1", "Elegir ciudad 2", ... "Elegir ciudad n-1".

La característica de factibilidad de las soluciones viene dada por el cumplimiento de las restricciones que se le hayan impuesto al problema. Para que las soluciones halladas sean factibles habrán de cumplir dichas restricciones. Una forma de conseguirlo sería que en el momento de decidir, se chequeara la factibilidad de cada posibilidad.

Sin embargo, otra manera más interesante de imponer la condición de factibilidad es restringiendo las opciones disponibles para cada decisión, lo que en algunos casos se podría realizar previamente, con el consiguiente ahorro de tiempo. Por ejemplo si en el caso del TSP se quisiera resolver el problema sin que ningún trayecto superara una determinada longitud, antes de comenzar a iniciar los viajes de hormigas artificiales se podría hallar, para cada ciudad, aquéllas otras que estuvieran dentro del límite de distancia, y esas serían las únicas opciones disponibles como próximo destino en caso de llegar a la primera.

Esta idea no siempre se puede aplicar, dado que para algunas restricciones no se conocen a priori qué opciones son factibles o no, puesto que dependen de propiedades que pueden variar con cada solución. En el apartado 6.1.4 se mostrará que este inconveniente se da en la implementación del ACO que se propone en este trabajo.

Una vez determinados los pasos que conducen a la generación de una solución factible, empezaría la ejecución de la parte principal del algoritmo, correspondiente a la actuación de las hormigas artificiales. Cada una de ellas debe tomar una decisión en cada paso, y eso pone de manifiesto el doble carácter del método, heurístico y estocástico [40].

El carácter estocástico se debe a que cada decisión tiene una componente aleatoria: se elige una de las opciones disponibles. Aunque con una probabilidad proporcional a una valoración de cada una. Dicha valoración no puede determinar cuál de las opciones para ese paso conduce a la mejor solución, ya que no se puede evaluar la solución completa, puesto que aún no existe e implicaría un alto coste computacional. Se dice que cada hormiga tiene una visibilidad limitada [38][40]-[44][46][47].

El carácter heurístico viene dado por el nivel de feromonas presente en las distintas opciones. Al final de cada proceso de generación de una solución, las opciones que se eligieron para llegar hasta ella se actualizan aumentando su cantidad de feromonas, de manera análoga al rastro que dejan las hormigas por los caminos que recorren. En rigor, las feromonas están asociadas no a la opción elegida, sino al objeto que representa “la elección de ese nodo desde el nodo anterior específico”. En el caso del TSP, si se elige una ciudad j como la próxima a visitar desde la ciudad i , las feromonas se asocian a la curva que une ambas, en lugar de a una opción “ciudad j ”.

El comportamiento estocástico, o relativo a descubrir nuevas soluciones que no hayan sido desarrolladas, se denomina exploración, mientras que el aprovechamiento de la información obtenida de soluciones generadas, o comportamiento heurístico, se denomina explotación.

La ecuación Ec. 6.1.7 calcula la probabilidad de que se elija la opción j cuando se eligió la opción i en el paso anterior, X_{ij} . Donde τ_{ij} es la cantidad de feromonas depositadas para la elección de j desde i , η_{ij} es la valoración de dicha decisión, α y β son parámetros que controlan la influencia relativa de los valores anteriores, N_{ops} el número de opciones disponibles y D el conjunto de opciones factibles para esta decisión.

$$P[x_{ij}] = Prob_{ACO}(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k=1}^{N_{ops}} [\tau_{ik}]^\alpha \cdot [\eta_{ik}]^\beta}, & x_{ij} \in D \\ 0, & x_{ij} \notin D \end{cases} \quad \text{Ec. 6.1.7}$$

Las ecuaciones Ec. 6.1.8y Ec. 6.1.9 sirven para calcular la actualización cantidad de feromonas de todas las opciones existentes en el espacio de soluciones en la iteración $t+1$. ρ es un coeficiente de evaporación de feromonas. τ_{ijk} es la cantidad de feromonas depositadas en la opción X_{ij} por la hormiga k . Esta cantidad es nula si dicha opción no pertenece a la secuencia de decisiones s_k de la hormiga k . $f(s_k)$ es una función relacionada con el parámetro que se busca minimizar, debe ser mayor cuanto mejor sean los resultados.

$$\tau_{ij,t+1} = \tau_{ij,t} \cdot (1 - \rho) + \Delta\tau_{ij} \quad \text{Ec. 6.1.8}$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \tau_{ijk}; \quad \tau_{ijk} = \begin{cases} f(s_k), & x_{ij} \in s_k \\ 0, & x_{ij} \notin s_k \end{cases} \quad \text{Ec. 6.1.9}$$

El algoritmo ACO en su versión más básica se desarrollaría como muestra la Figura. Dicha versión se denomina Sistema de Hormigas (AS) [40]-[43][47][49]-[51] Como se puede observar, el algoritmo principal se ejecuta iterativamente y en cada repetición se genera una población de hormigas. Cada hormiga genera una solución factible, eligiendo para cada decisión una de las opciones disponibles, según la probabilidad calculada siguiendo la Ec. 6.1.7.

Posteriormente, las soluciones generadas en cada iteración son evaluadas, y las feromonas se actualizan para los arcos o caminos genéricos entre las opciones implicadas, es decir, si en una solución se tomó la opción i en el paso d , y la j en el paso $d+1$, se actualizarán las feromonas del camino “elegir j desde i ”. Se almacena la solución que obtiene una mejor valoración según la función objetivo f de la Ec. 6.1.9. Finalmente, de entre todas las soluciones seleccionadas en las distintas iteraciones, se elige la mejor.

Figura 32: algoritmo de Sistema de Hormigas (AS)

6.1.3.3 Inconvenientes del ACO estándar

El algoritmo ACO, en su versión estándar, demostró no ser competitivo para la resolución del problema TSP, comparado con otros algoritmos meta heurísticos y diversos métodos específicos de dicho problema [40]. Más adelante se verificó que para una gran variedad de problemas, la versión estándar presentaba varios defectos en su ejecución [40]-[43]. A continuación se describirán, dado que es importante tenerlos en cuenta para implementaciones del método.

Se denomina estancamiento, al fenómeno que hace que, tras un número inicial de iteraciones del método, las hormigas artificiales elijan siempre las mismas opciones y generen la misma solución una y otra vez, debido a la cantidad de feromonas depositadas en dicha secuencia. Aunque cada decisión se toma con una componente basada en la probabilidad no hay que olvidar que dicha probabilidad se calcula de forma proporcional a una serie de valores, y si estos son muy altos para alguna opción en comparación con el resto y siguen aumentando con cada selección, la consecuencia será que ya no se elija ninguna otra. Supone una pérdida del carácter de exploración, y es un defecto que puede evitarse controlando los parámetros existentes en la versión estándar [40][43].

La convergencia prematura es similar al estancamiento, puesto que se deriva de una pérdida de la exploración. Sin embargo es un defecto que está asociado a la estructura de la versión inicial o estándar del método, y no puede controlarse con los parámetros de dicho modelo [38][43]. A causa del crecimiento de las feromonas cada vez que se selecciona una opción, se tiende a determinar unas soluciones finales que ya no varían, aunque el espacio de soluciones no se ha explorado de manera eficaz. Las variantes del método existentes se han desarrollado, en gran medida, para evitar la convergencia prematura [40][50].

La convergencia lenta es el efecto opuesto al descrito anteriormente. Se presenta cuando tras un alto número de iteraciones sigue sin haber una solución con un nivel de feromonas lo bastante alto como para diferenciarla del resto como un posible óptimo del problema. Se debe a que se ha potenciado en exceso el carácter de exploración frente al de explotación [40][49][50].

Para evitar los defectos comentados, se han desarrollado diversas variantes del método original, así como mejoras que incrementan la calidad de las soluciones y la velocidad de convergencia. A continuación, en el apartado 6.1.3.4, se describen las de más relevancia encontradas en la literatura.

6.1.3.4 Variantes de ACO

Existen diversas variaciones del método creado originalmente, el AS, ya descrito. La más extendida se denomina Sistema de Colonia de Hormigas (ACS), pero existen otras mejoras y variantes desarrolladas para adaptarlo a problemas específicos.

El método AS original tiene un comportamiento recogido en las ecuaciones Ec. 6.1.7, Ec. 6.1.8 y Ec. 6.1.9. Sin embargo, se ha verificado que al implementarlo su ejecución incurre en los fallos descritos en el apartado 6.1.3.3, que no siempre son evitables mediante el ajuste de los parámetros del método [38][40]-[44][46][47][49][50]. Por esa razón se desarrollaron varias mejoras posibles.

Inicialmente, se probó a incorporar un nuevo mecanismo de actualización de las feromonas, pero que actuara localmente, en lugar de una vez desarrollada la solución correspondiente completa. Es decir, en cada paso, la opción elegida veía aumentado su nivel de feromonas. Se desarrollaron dos variantes, densidad de hormigas y cantidad de hormigas, en las que se incrementaban las feromonas una cantidad constante y una cantidad proporcional a la valoración de la opción, respectivamente. Sin embargo, estas modificaciones obtuvieron peores resultados que el método AS sencillo [41], aunque la idea de la actualización local no se desechó por completo.

Otra mejora que se desarrolló consistió en incluir una estrategia elitista, según la cual se aportaba un extra de feromonas a la solución o rango de soluciones con mejores resultados de cada iteración. Además, se planteó un control de los valores máximos y mínimos de feromonas en cada opción [40], principalmente para evitar la convergencia prematura.

La incorporación y refinamiento de todas las ideas descritas tuvo como resultado la creación de una nueva versión del método, conocida como ACS. Esta nueva revisión incluye varios aspectos que repercuten en la obtención de mejores resultados. En primer lugar se incluyó el parámetro q_0 , para incrementar la faceta de explotación. Así, con una probabilidad de q_0 , se elegía en cada paso la opción que maximizara una función del nivel de feromonas y de la valoración local, mientras que con probabilidad $(1-q_0)$ se empleaba el método basado en la probabilidad proporcional de la Ec. 6.1.7. La Ec. 6.1.10 recoge esta actuación, siendo q una variable de valor aleatorio entre 0 y 1 que se calcula de nuevo para cada paso.

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{x_{ij} \in D} \{ [\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta \}, & q \leq q_0 \\ s, \text{ with } P[x_{is}] = \operatorname{Prob}_{ACO}(x_{is}), & q > q_0 \end{cases} \quad \text{Ec. 6.1.10}$$

Además, se modificó el mecanismo de actualización global de las feromonas (tras cada iteración de m hormigas). Se varió la Ec. 6.1.8, para evitar que una solución con buenos resultados se primara de forma que no se exploraran otras posibilidades y diera lugar a un posible estancamiento. El resultado fue la Ec. 6.1.11. Además esta actualización sólo se aplicaba a la mejor solución de cada iteración, siguiendo una estrategia elitista. El valor de $\Delta\tau_{ij}$ se seguía calculando mediante la Ec. 6.1.9.

$$\tau_{ij,t+1} = \tau_{ij,t} \cdot (1 - \rho) + \rho \cdot \Delta\tau_{ij} \quad \text{Ec. 6.1.11}$$

Por último, se incluyó la actualización local de las feromonas, aunque esta vez con el propósito de evitar que el nivel de feromonas de algunas opciones creciera demasiado, y mantener un nivel mínimo para todas las demás. Se incluyó un nivel inicial mínimo de valor τ_0 para todas las opciones, y para cada opción elegida se disminuía su nivel en función del incremento que llevaran desde el inicio, como recoge la Ec. 6.1.12. Finalmente, por simetría con la actualización global de la Ec. 6.1.11, se expresó como muestra la Ec. 6.1.13.

$$\tau'_{ij} = \tau_{ij} - \rho \cdot (\tau_{ij} - \tau_0) \quad \text{Ec. 6.1.12}$$

$$\tau_{ij}' = \tau_{ij} \cdot (1 - \rho) + \rho \cdot \tau_0 \quad \text{Ec. 6.1.13}$$

Se ha descrito el método ACS, la variante más empleada y aceptada como más eficaz de algoritmo ACO [40]-[44][46][47][49][50]. Aún así, existen variantes del ACS, y mejoras propuestas por diversos autores, se estima adecuado realizar un repaso de las más significativas.

Existen las denominadas acciones de mejora del algoritmo, que principalmente consisten en añadir al bucle principal un método heurístico que mejore cada solución factible actual hasta el óptimo local más cercano. En este sentido, lo más empleado es incluir el procedimiento de búsqueda local que, para una solución dada, recorre todas sus decisiones y elige una opción mejor en caso de encontrarla [44].

Otros métodos heurísticos añadidos como acciones de mejora son la eliminación de un nodo (por ejemplo una ciudad en el caso del TSP) y su sustitución por otra opción que mejore el resultado o la heurística de 3 opciones, mediante la cual se eliminan 3 decisiones consecutivas y se eligen otras distintas que mejoren los resultados [49].

Otra mejora interesante es la modificación de parámetros del método durante su misma ejecución. Por ejemplo, controlando el exponente β que regula la importancia de la valoración, de forma que vaya disminuyendo según se adquiere un mayor nivel de información heurística [43]. También se ha probado, con resultados positivos, la modificación del índice de evaporación ρ para las soluciones que hayan sido generadas repetidas veces, con el propósito de evitar posibles estancamientos.[50].

Una vez comentado el método original, junto con sus variaciones más estudiadas y aceptadas, se describirá detalladamente el método adoptado final para el problema IPTP tal y como se ha formulado.

6.1.4 Método ACO final aplicado al problema IPTP

Anteriormente se ha descrito el enfoque propuesto de la definición de la red logística, se ha catalogado como problema de optimización discreta de tipo NP, se ha destacado los métodos meta heurísticos para su resolución, de entre los cuales se ha seleccionado de forma justificada el ACO y se ha explicado detalladamente sus fundamentos y posibles variantes. En esta sección se expondrá el método final desarrollado, que emplea el planteamiento de ACO.

Se ha adoptado la variante de algoritmo ACO denominada Sistema de Colonia de Hormigas (ACS), que incluye una actualización local del nivel de feromonas y un ajuste del carácter exploratorio. Se expondrá la manera desarrollada para generar la secuencia de decisiones que conduce a soluciones factibles, las restricciones contempladas, la forma de abordar la definición del transporte y el algoritmo final diseñado. La Tabla 20 incluye la nomenclatura empleada.

6.1.4.1 Secuencia para la generación de soluciones

Como se puso de manifiesto en el apartado 6.1.3.2, un aspecto fundamental para la implementación de un método basado en un algoritmo de tipo ACO, es la formulación del problema de forma que la generación de una solución factible se pueda llevar a cabo mediante una secuencia de decisiones.

La secuencia para el caso TSP es obvia: “Elegir ciudad 1”, “Elegir ciudad 2”,... “Elegir ciudad n-1”. La forma más obvia de secuenciar las decisiones que conducen a una solución del problema IPTP sería trasladar esa idea al conjunto de plantas que se deben seleccionar en la distribución logística (“Elegir planta 1”,... “Elegir planta N_{IN} ”). Para que ello sea posible, en primer lugar se debe realizar una transformación de la estructura As Planned, que posee varios nodos, muchos de ellos con varios hijos, en una secuencia lineal (Ver Figura 30). En este punto se plantea el primer problema: determinar por qué nodo se debe empezar.

La elección del primer nodo que se debe posicionar se realiza según un criterio que deriva de una idea que busca la exploración del espacio de soluciones más eficaz posible:

“Dado que la generación de una solución es un proceso estocástico de toma de decisiones, las primeras de ellas serán las que condicionen en mayor medida la solución final. Por tanto se debería elegir para ello los nodos que a su vez tengan una mayor relevancia dentro de cada instancia particular del problema.”

En el caso del problema IPTP se considera que la decisión en cuanto a la selección de la planta con mayor relevancia para la solución será la de aquel nodo que tenga un mayor número de conexiones con otros nodos. Se debe tener en cuenta que cada conexión representa el transporte de un componente o montaje, y supone un coste que crece con la distancia entre el origen y el destino, por lo que controlar la ubicación del nodo relacionado con un mayor número de transportes hará que las soluciones generadas tengan mayor calidad. En el algoritmo dicho nodo se posicionará favoreciendo las plantas con una mejor comunicación.

Sin embargo, también es necesario tener en cuenta el peso de cada producto a transportar, dado que puede haber mucha diferencia según la fase de la producción en que se produzca el transporte, lo que a su vez tendrá repercusión en el coste del mismo. Por esta razón se definió un índice que permitiera determinar el nodo más adecuado para ser el primero en posicionar.

Dicho índice, I_{TRANS} , se podía definir según varias posibilidades, la más evidente era emplear el número de uniones del nodo i con otros nodos previos, NPr_i , y con su nodo siguiente, como muestra la Ec. 6.1.14. Sin embargo, un nodo tiene influencia también según el peso del producto que traslade, puesto que a mayor peso, se requerirán recursos de mayores prestaciones. La Ec. 6.1.15 tiene esto en cuenta, e incluye en el criterio la suma de los pesos de los productos saliente del nodo y entrantes en él (son los salientes de los nodos previos). Finalmente, se ha optado por un criterio que incluya las dos opciones comentadas, ya que el número de transportes en sí mismo también determina un número discreto de recursos o vehículos, y se estima que se debe tener en cuenta de forma independiente del peso transportado total. Se empleará, por tanto, la Ec. 6.1.16.

$$I_{TRANS_{Ai}} = NPr_i + 1 \quad \text{Ec. 6.1.14}$$

$$I_{TRANS_{Bi}} = WPO_i + \sum_{t=1}^{NPr_i} WPO_t \quad \text{Ec. 6.1.15}$$

$$I_{TRANS_{Ci}} = C_{TR} \cdot I_{TRANS_{Ai}} + I_{TRANS_{Bi}} \quad \text{Ec. 6.1.16}$$

Todo lo anterior define el criterio para seleccionar por qué nodo industrial se debe comenzar a definir la solución; pero la secuencia con que se completa el resto de la solución no es trivial. No basta con continuar con los otros nodos según, por ejemplo, el valor decreciente del índice I_{TRANS} . La elección de cada planta se evalúa en términos de repercusiones para las necesidades de transporte. Y para valorar un transporte se debe conocer el origen y el destino. Por tanto, una vez elegido el primer nodo, el resto se deben recorrer empezando con aquéllos que tengan conexiones con él (nodos previos y nodo sucesor), y luego se seguirá con los que tienen conexiones con ellos y así sucesivamente. Cuando no se encuentren más nodos relacionados según esta norma, se continuará con el nodo sin asignar con un mayor valor de I_{TRANS} .

Figura 33: algoritmo para generar la secuencia de decisiones que da lugar a una solución del IPTP.

La Figura 33 muestra el algoritmo diseñado. Se observa que se designa un “CurrentNode” según el valor de I_{TRANS} , se asigna a la secuencia de decisiones, luego su “nodo padre” (es decir, el sucesor) y finalmente todos sus nodos previos, después se designa al nodo padre como nuevo CurrentNode y así sucesivamente hasta remontar al nodo final (cuyo nodo padre es el objeto vacío “Nothing”), y se continúa con el resto de nodos sin asignar. El transporte hasta el nodo padre se considera más importante que el que proviene de los previos, por eso se establece antes en la secuencia, aunque el algoritmo sería más sencillo si se procediera de otro modo.

6.1.4.2 Restricciones del modelo

Como se discutió en el apartado 6.1.3.2, la característica de factibilidad de las soluciones viene dada por el cumplimiento de las restricciones que se le hayan impuesto al problema. Las soluciones sólo se considerarán factibles si cumplen la totalidad de dichas restricciones. Eso se puede conseguir principalmente de dos formas, restringiendo las opciones disponibles para cada decisión de forma previa a la ejecución del algoritmo principal, o bien chequeando la factibilidad de cada opción durante la misma.

La idea de calcular todas las restricciones que limitaban las opciones a priori es interesante, puesto que de esa forma se reduce cierto tiempo de cálculo en cada generación de una solución, lo que multiplicado por el número de hormigas y el número de iteraciones puede suponer un ahorro importante. Sin embargo no es aplicable para todas las restricciones, especialmente en el caso de restricciones de transporte. Se debe a que con cada solución, las condiciones pueden ser diferentes.

Para evitar tener que estudiar la factibilidad con cada hormiga artificial, una posible opción es desarrollar todo el árbol de alternativas posibles y evaluarlas previamente. Sin embargo, el número de opciones posibles puede ser muy elevado. Por ejemplo, para el caso de 20 localizaciones, se deberían evaluar un total de 400 posibles trayectos (las restricciones de transporte cambian según el sentido de cada trayecto) multiplicados, si nos basamos en el PRD definido, por 329 medios posibles (5 medios, más las 18 combinaciones binarias posibles si se realiza una escala, multiplicadas por las 18 ciudades en que se podría realizar dicha escala). En ese caso se debería hacer un total de 131600 verificaciones, lo cual no se puede considerar un problema de explosión combinatoria, aunque sí enlentece la ejecución. Finalmente se ha optado, en el caso de los transportes, por verificar su factibilidad en cada decisión.

A continuación se repasarán las restricciones incluidas en el método diseñado para la determinación de la distribución logística. Se especificará la forma de chequearlas y si se hace de forma previa a la ejecución del algoritmo ACS.

Una restricción fundamental es el espacio libre de cada planta industrial. Las distintas plantas definidas en el PRD tienen un atributo con la superficie disponible en cada una de ellas. Para que una planta se considere una opción factible para la localización de un nodo industrial, evidentemente el espacio disponible debe ser mayor que el requerido por dicho nodo. Esta restricción se puede comprobar a priori, pero se debe volver a chequear dentro de la ejecución, debido a que una planta industrial se puede emplear para localizar más de un nodo, y con cada nuevo nodo localizado, se actualiza el valor del espacio disponible en esa solución.

Si la distribución logística se define antes del bloque en que se concreta cada línea de montaje, o alguno de los nodos no está definido aún en ese sentido, el espacio requerido puede no estar calculado. En esos casos se emplea un valor por defecto de 4000 m². Por otro lado, los componentes individuales no se originan con un proceso de montaje, pero sus plantas de origen también se incluyen en la red logística. Ese tipo de nodos tendrá un espacio requerido de valor nulo, ya que se entiende que sus procesos de fabricación están ya fijados y contemplados dentro de las posibles plantas donde se realice.

Figura 34: localizaciones permitidas para elección como lugar de escala.

Otra restricción importante para las plantas disponibles es su altura mínima. Algunos productos del sector aeronáutico tienen secciones con alturas del orden de 20 metros, por lo que el techo de las naves donde se realicen los procesos de montaje finales deberá tener cierta altura mínima, en la que se incluirá un margen para las cerchas del techo y posibles recursos como grúas o poleas. La altura mínima requerida depende de los componentes concretos que se deban procesar, una planta puede ser adecuada para ensamblar parte del fuselaje pero no como planta para el montaje final del avión. Dado que la estructura As Planned es conocida en este paso, la verificación de la altura mínima se puede realizar a priori.

No todos los posibles transportes está disponibles para cualesquier origen y destino. Por ejemplo muchas de las localizaciones no tienen un puerto cercano, por lo que no se puede considerar el transporte marítimo directo hasta ellas. Esta restricción no se puede chequear previamente a la ejecución, dado que la localización de cada nodo industrial se realiza al ir desarrollando cada solución.

Existe la posibilidad de trayectos mixtos con una escala en la que se cambie de medio de transporte. Para esos casos debe haber compatibilidad de medios entre el origen y la escala, y la escala y el destino. Además, se ha añadido la restricción de que la localización donde se realiza la escala debe encontrarse dentro de la circunferencia cuyo diámetro es el segmento entre los nodos origen y destino. Habría que hablar de distancias generalizadas, dado que varían entre dos ciudades dependiendo del medio de transporte. La Figura 34 muestra una representación de las localizaciones disponibles como escalas del transporte entre dos plantas.

Dentro de la elección del modo de transporte más adecuado, también se debe comprobar el peso del producto a transportar y la capacidad del vehículo que se empleará. Esta capacidad debe ser suficiente para transportar al menos una unidad del producto. De no ser así, no se considerará esa opción factible. Esta restricción sí se puede chequear de forma previa, puesto que se conoce qué producto debe viajar entre qué nodos industriales, aunque se desconozca aún sus ubicaciones.

Las ecuaciones Ec. 6.1.17 a Ec. 6.1.21 expresan las restricciones discutidas. X_{ij} representa la posibilidad de escoger la planta j para un nodo n cuando se eligió la opción i en el anterior y D_i representa el conjunto de opciones factibles para dicha decisión. T_{ijs} representa la posibilidad de elegir el medio de transporte s para el trayecto entre las plantas i y j , y TD_{ij} representa el conjunto de opciones factibles para dicha decisión. RS_n , HPO_{n-1} y WPO_{n-1} representan la superficie en planta requerida para el nodo n y la altura máxima y el peso del producto saliente del anterior; AS_j , H_j y WC_s representan la superficie disponible y altura mínima de la planta j y la capacidad de carga del medio s , respectivamente.

Ecuaciones del método ACO:

- NPr_i es el número de nodos precedentes del nodo i
- CoT_i es el coste del transporte del nodo i al siguiente
- AS_j es la superficie disponible dentro de una planta j .
- H_j es la altura mínima del espacio disponible dentro de una planta j .
- $NALN_i$ es el número de nodos de la red directamente relacionados con el nodo i que ya se han asignado a una planta.
- D_{ijA} , D_{ijL} y D_{ijS} son las distancias a recorrer entre nodos i y el j con medios de carácter aéreo, terrestre y marítimo, respectivamente.

Tabla 20: nomenclatura de las reglas para el cálculo de parámetros al aplicar el método ACO.

Las matrices de distancias se han estructurado de forma que cuando un transporte no es factible entre dos localizaciones, se devuelve un valor de -1, por tanto una condición es que ese valor sea positivo. T_{ijkst} representa la posibilidad de elegir un transporte mixto, con escala en la planta k y usando los medios s y t respectivamente. El medio m es genérico, de forma que la distancia D_{ijm} se calcula como la media de las distancias de i a j según los medios s y t , o una distancia por defecto en caso de que alguna de las dos no sea compatible.

$$x_{ij} \in D_i \Rightarrow AS_j \geq RS_n \quad \text{Ec. 6.1.17}$$

$$x_{ij} \in D_i \Rightarrow H_j \geq HPo_{n-1} \quad \text{Ec. 6.1.18}$$

$$T_{ijs} \in TD_{ij} \Rightarrow D_{ijs} \geq 0 \quad \text{Ec. 6.1.19}$$

$$T_{ijs} \in TD_{ij} \Rightarrow WC_s \geq WPO_{n-1} \quad \text{Ec. 6.1.20}$$

$$T_{ijkst} \in TD_{ij} \Rightarrow \begin{cases} T_{iks} \in D_{ik} \\ T_{kjt} \in D_{kj} \\ D_{iks}^2 + D_{kjt}^2 \leq D_{ijm}^2 \end{cases} \quad \text{Ec. 6.1.21}$$

6.1.4.3 Determinación del transporte

Una parte importante del problema IPTP consiste en determinar la combinación de transportes que cubra toda la red, obteniendo la solución más cercana al óptimo posible. Como ya se ha comentado previamente, las distancias entre localizaciones varían dependiendo de si es un transporte aéreo, marítimo o terrestre, y algunos tipos de transporte o medios no son compatibles con ciertos trayectos.

Otra característica de la red de transportes que se plantea es que admite transportes mixtos, es decir, con una escala intermedia en la que se cambia de vehículo. Esta posibilidad aporta mayor diversidad a las soluciones, aunque hace el problema más complejo pues aumenta el número de posibilidades. De todos modos es necesario incluir la posibilidad, puesto que de otra forma habría trayectos inviables según cualquier posibilidad del modelo, como por ejemplo algunos de los que debieran comunicar nodos que únicamente admitan transporte terrestre con nodos ubicados, por ejemplo, en Reino Unido. Existen formas de transporte no disponibles entre localizaciones, pero para cada par de ellas debe existir al menos una que sea viable.

Para incluir el cálculo del transporte en el método propuesto, una alternativa consistía en integrar la elección del medio de transporte entre cada par de nodos como una decisión más dentro de la secuencia para generar soluciones del algoritmo ACS. Esto es factible pero presenta el inconveniente de la actualización de las feromonas. Cuando se incrementa las feromonas de la solución, no se puede incrementar unas feromonas asociadas a cada transporte elegido, sino que tienen que estar asociadas a la decisión de elegir ese medio específicamente como transporte entre los nodos origen y destino correspondientes.

Dicho de otro modo, al arco que une ambos nodos usando ese medio. Por tanto habría que definir todos los arcos existentes entre nodos, teniendo en cuenta medios posibles, transportes mixtos y las posibles escalas para ellos.

Si se definen todos los arcos posibles, manteniendo el ejemplo del apartado 6.1.4.2, tendríamos 131600 arcos (20 localizaciones, 5 medios de transporte y posibles transportes mixtos con una escala). Se puede hacer en ese caso una actualización de las feromonas, pero la ejecución sería demasiado lenta, debido al proceso de creación de todos los objetos de clase arco, y también a las necesarias búsquedas del arco correspondiente para actualizar sus feromonas, proceso que se repetiría a menudo durante la actuación de todas las hormigas y la ejecución de todas las iteraciones.

Esa razón tendría peso suficiente para no realizar la determinación del transporte mediante el método ACS, pero existe otra que señala que no se desprende ninguna ventaja del hecho de determinar el transporte mediante un método meta heurístico. Uno de los motivos de usar este tipo de métodos es la poca visibilidad de la solución global cuando se está definiendo paso a paso [36]-[40]. Por tanto las valoraciones de las distintas decisiones se consideran miopes, por lo que se hace necesario una evaluación posterior de la solución para determinar su calidad y, en el caso del método ACO, el incremento de feromonas.

En el caso del transporte, no obstante, se puede realizar una valoración precisa de cada decisión, puesto que únicamente se puede determinar cuando se conoce el origen y el destino. Por ello, sencillamente, es posible evaluar todas las posibilidades en cada decisión y quedarse con la mejor. Además el tiempo requerido es similar e incluso inferior al que supondría emplear el algoritmo ACS, puesto que también sería necesaria una valoración de todas las opciones y luego una actualización de las feromonas.

Se debe puntualizar que esto es válido siempre que se acepte la hipótesis de que la elección de un medio para un trayecto no tiene consecuencias para la red más allá de su contribución al coste total y al tiempo requerido. Por ejemplo, si la elección de un medio para un trayecto le restara disponibilidad para los otros, eso reduciría visibilidad en cada evaluación, y no se podría asegurar que se fuese a obtener un óptimo global.

Se puede considerar que esta forma de determinar la combinación de transportes más adecuada es análoga al método heurístico del Vecino Más Próximo, en el que para cada decisión se elige la opción mejor valorada (en el caso del TSP sería la ciudad o “vecino” más próxima), aunque en ese caso no se garantiza la obtención de un óptimo, dado que cada valoración no tiene suficiente visibilidad.

El transporte óptimo, dados un origen y un destino, se calcula en el método propuesto según el algoritmo de la Figura 35. Se realiza un recorrido por todas las opciones disponibles y se evalúa cada una mediante la función Eval, cuyas reglas de cálculo se explicarán en el siguiente apartado. Para las opciones que representen un transporte mixto, se evalúa todas las posibilidades factibles de localización de la escala. Para que sea factible debe cumplir las ecuaciones Ec. 6.1.19 a Ec. 6.1.21. Se elige el lugar de la escala para el que se obtiene mejor puntuación, y la puntuación de esa opción será la media de las obtenidas para los trayectos origen-escala y escala-destino. Por último, se escoge la opción que haya obtenido una mejor puntuación.

La integración del método para determinar el transporte óptimo se iba a realizar, en un principio, de forma completa, es decir, incluyendo la llamada a dicha función dentro de la generación de soluciones por parte de cada hormiga artificial. Sin embargo, desde las primeras implementaciones, se comprobó, que eso suponía un tiempo de ejecución demasiado elevado, de unos 30 segundos de media para que una hormiga artificial generase una solución. Eso hacía inviable que se pudiera realizar un número suficiente de iteraciones con una población de unas 20 hormigas.

Figura 35: determinación del transporte entre dos nodos industriales ya localizados.

Por ello se decidió sacar la elección del transporte del bucle principal. Pero seguía existiendo un problema: se podría aislar por completo la selección del transporte y que sólo se ejecutara para la solución final obtenida de todo el método ACS, pero entonces no se podría hacer una evaluación completa de las soluciones generadas por las hormigas en cada iteración. Para realizar una valoración adecuada de una solución es necesario conocer los transportes que tiene asociados, y no únicamente las localizaciones y plantas seleccionadas y las distancias entre ellas.

Figura 36: algoritmo general, con el cálculo del transporte dentro del bucle principal.

La Figura 36 muestra el algoritmo en su diseño inicial, con la llamada a la selección de transporte dentro del algoritmo principal. Como se puede observar, presenta varios bucles de tipo “for” anidados, para repetir las iteraciones fijadas, con el número de hormigas definido y recorriendo cada una el número de decisiones de la secuencia que genera una solución. Dado que la propia función llama a varios bucles anidados y prueba un número elevado de alternativas, es fácil deducir que el proceso se ralentizaría considerablemente. Y se ha comprobado que de esa forma no sería viable el método completo, ya que requeriría un tiempo del orden de varias horas, dependiendo del número de iteraciones fijado.

La alternativa que se propone es llamar a la función un número limitado de veces durante cada iteración. Se generarían soluciones parciales sin ningún transporte, y cada una se evaluaría con un criterio que estimase los resultados finales. El algoritmo se quedaría con un número a determinar de las mejores soluciones, por ejemplo el 10%, y se seleccionaría el transporte únicamente para ellas. Posteriormente esas soluciones se evaluarían de forma completa, se almacenaría la mejor y se actualizarían las feromonas de los arcos que utilizase.

La alternativa descrita fue la empleada para diseñar el algoritmo definitivo, que se detalla en el siguiente apartado. La Figura 37 muestra dicho algoritmo, con la llamada a la selección del transporte fuera del bucle principal.

6.1.4.4 Algoritmo binivel: elección de las plantas y elección del transporte

El método finalmente diseñado consiste en un algoritmo de dos niveles. Hay un nivel dominante, en el que se seleccionan las plantas industriales, con su localización, para los distintos nodos de la red, lo cual determina en gran medida cada solución. En el nivel secundario o subordinado, se calcula el transporte de cada solución, conocidas ya las ubicaciones de todos los nodos.

Los nodos existentes en la red pueden ser de dos tipos, los nodos industriales engloban un proceso de montaje, tienen varios componentes o sub montajes de entrada y un producto de salida; los nodos de origen únicamente tienen un componente de salida y su proceso de fabricación queda fuera del alcance de la metodología, por lo que no se imponen requisitos a esas plantas, representan la posición de las fábricas que serán proveedoras de componentes, pero cuya localización también se debe determinar. Sólo algunas de las localizaciones disponibles pueden seleccionarse para nodos origen, y cada una sólo para unos componentes determinados. En la Figura 30 se puede apreciar la existencia de los dos tipos de nodo en la zona de la red logística.

Se debe llamar la atención sobre que se contempla que el usuario, previamente a la ejecución del proceso de optimización, fije un número de los aspectos que se busca definir. Dicho de otro modo, que tome por sí mismo algunas de las decisiones que el sistema resuelve automáticamente al ejecutar el método. Se estima que esta posibilidad es importante puesto que en la práctica muchos de los nodos, o bien los centros proveedores, ya tienen una localización asignada. También se permite definir de forma manual varios transportes de la red.

La Figura 37 muestra el algoritmo. El primer paso consiste en la creación de las alternativas factibles para cada nodo, primero en cuanto a localizaciones y luego en cuanto al transporte. Para ello se verifica que las opciones existentes, las localizaciones y los transportes disponibles, cumplan las restricciones que sí son verificables a priori. Para las localizaciones se comprueba que la superficie disponible y la altura cumplan los requisitos (Ec. 6.1.17 y Ec. 6.1.18, respectivamente), si se trata de un nodo industrial, o bien pueden servir como proveedoras del componente de salida, si se trata de un nodo origen. Para los transportes, únicamente se puede comprobar si los vehículos asociados a cada opción tienen una capacidad mayor que el peso del producto a transportar (Ec. 6.1.20).

Una vez se han obtenido las opciones factibles para la localización de cada nodo y el transporte desde él, comienzan las iteraciones. Cada iteración implica la ejecución del nivel dominante para el número de hormigas definido. A su vez, el nivel dominante comprende la generación de soluciones factibles de ese nivel (localizaciones de los nodos), la ejecución del nodo subordinado y la evaluación de soluciones. Por simplicidad, se separarán en apartados diferentes, aunque en rigor el segundo nivel y las evaluaciones finales son parte del nivel primario.

Figura 37: algoritmo de dos niveles para la definición de la red logística.

6.1.4.5 Nivel dominante del algoritmo

El nivel dominante sigue un algoritmo de tipo ACS, es decir, basado en la Optimización de Colonia de Hormigas (Ec. 6.1.7) con particularidades como la compensación probabilística de la faceta de exploración (Ec. 6.1.10), la actualización global de las feromonas ajustada (Ec. 6.1.11) y la actualización local para compensar la faceta de explotación (Ec. 6.1.13).

Durante cada iteración, se genera un número de hormigas que construyen soluciones, siguiendo la secuencia de decisiones creada previamente. En cada decisión se valora una evaluación local (miope, o de visibilidad reducida) de cada opción y el nivel de feromonas depositado en ese arco para, o bien elegir la opción de mejor resultado, o bien una obtenida al azar con probabilidades proporcionales a los resultados. Se elige un camino u otro, respectivamente, según si una variable aleatoria, $rVal$, supera un valor q_0 . Después se actualiza localmente el nivel de feromonas asociado a la opción elegida y el bucle continúa con la siguiente decisión.

Las ecuaciones Ec. 6.1.22 a Ec. 6.1.25 muestran la forma de calcular la valoración miope de una opción j en el paso n , cuando se eligió la opción i en el paso anterior. Se emplea una componente relacionada con las distancias desde la planta a los nodos relacionados, una componente relativa al coste horario de la planta ajustado al espacio requerido (Ec. 6.1.24) y una componente asociada al nivel de los salarios del país en que está ubicada la planta (Ec. 6.1.25). Todas las componentes se calculan de forma inversamente proporcional a las variables descritas, con el objetivo de minimizar costes y tiempos. Además incluyen una constante empleada para equilibrar sus pesos relativos. Los nodos de tipo origen (en lugar de nodos industriales) no requieren la utilización de parte de la superficie de una planta, ya que sus procesos no se incluyen en el alcance de la aplicación, por lo que cuando se trata de un caso de ese tipo, no se incluye la segunda componente en la valoración.

La primera componente, P_{1j} , se calcula según la Ec. 6.1.23. Se emplea un valor ponderado de la suma de distancias de los nodos relacionados a la planta que se evalúa. Únicamente se tiene en cuenta los nodos que ya han sido ubicados en la solución actual, $NALN$. Se consideran nodos relacionados a aquéllos de donde parten los productos de entrada o a donde se dirige el producto de salida del nodo actual. Se calcula cada distancia según si se cubriría por tierra, aire o mar, pues es distinta en cada caso. Además, dicha distancia se ajusta con unos coeficientes para tener en cuenta el precio de cada medio. Las distancias se ponderan también con el peso del producto que se transporta (se emplea el producto de salida del nodo k si es un nodo de entrada, o el de el propio nodo j , si el primero es el nodo destino).

Esta primera componente se define de forma distinta si se trata de la primera decisión de la solución, dado que ningún otro nodo ha sido ubicado aún y que es más adecuado posicionarlo en las plantas con mejor comunicación, como se detalla en el apartado 6.1.4.1. En este caso no se tiene en cuenta el peso de ningún producto a transportar, sencillamente porque no se conoce en qué planta se ubicará cada nodo relacionado con el actual.

Las distancias se calculan según unas matrices que tienen en cuenta el tipo de medio de transporte, como se detalla en el apartado 5.4. Cuando se trata de la distancia cuando el origen y el destino coinciden, la distancia que devuelve la función es 0, y para ese caso se considera que la suma de los inversos de los tres tipos de distancia es 1. Esta posibilidad puede parecer absurda, pero se debe tener en cuenta que una misma planta puede acoger a varios nodos industriales si se cumplen sus requisitos conjuntos de superficie. Además es una posibilidad que mejora cualquier solución, puesto que evita un transporte de la red. Si no es factible viajar entre dos plantas por un tipo de medio, esa distancia no se suma. Si entre dos nodos no hay comunicación directa posible, se otorga un valor mínimo, puesto que existiría la posibilidad de un transporte mixto.

$$\eta_{ij} = P_{1j} + P_{2j} + P_{3j} \quad \text{Ec. 6.1.22}$$

$$P_{1j} = \begin{cases} C_1 \cdot \sum_{k=1}^{NLN} \left[\frac{1}{D_{kjA}} + \frac{1}{D_{kjL}} + \frac{1}{D_{kjS}} \right], & \text{first node to locate} \\ C_1 \cdot \sum_{k=1}^{NALN_j} \left(\left[\frac{1}{D_{kjA}} + \frac{1}{D_{kjL}} + \frac{1}{D_{kjS}} \right] \cdot \frac{1}{WPO_{k|j}} \right), & \text{other case} \end{cases} \quad \text{Ec. 6.1.23}$$

$$P_{2j} = C_2 / \left[\frac{RS_n}{AS_j} \cdot CH_j \right] \quad \text{Ec. 6.1.24}$$

$$P_{3j} = C_3 / WL_j \quad \text{Ec. 6.1.25}$$

La elección de una opción según probabilidades o la mayor puntuación se realiza siguiendo las ecuaciones Ec. 6.1.7 y Ec. 6.1.10, mientras que la actualización local del nivel de feromonas se determina mediante la ecuación Ec. 6.1.13.

Una vez todas las hormigas de la iteración han generado sus soluciones para el primer nivel del algoritmo, asociado a la ubicación de los nodos de la red, se debería ejecutar el segundo, para la determinación del transporte de productos entre las localizaciones asignadas. Pero dicha ejecución no se puede realizar para todas las soluciones, como se justifica en el apartado 6.1.4.3, debido al tiempo que requeriría.

Por esa razón se ha decidido aplicar la determinación del transporte sólo a un número de las soluciones, las que obtengan mejores resultados en una evaluación. Dicha evaluación se debe realizar sin contar con la información relativa al transporte, no definida aún, por lo que será una aproximación. El número de soluciones seleccionadas está representado en el algoritmo de la Figura 37 por la variable N_{top} .

Las soluciones parciales sin transporte se evalúan mediante la Ec. 6.1.26, análoga a la empleada para realizar la valoración miope (Ec. 6.1.22). Se usan tres componentes relacionados con las distancias, el coste horario de la planta y el nivel de los salarios, calculados según las ecuaciones Ec. 6.1.27 a Ec. 6.1.29. La diferencia es que en esta ocasión se deben sumar los valores de todos los nodos de la solución. Para el cálculo de la primera componente, P_{1s} , se suma la distancia ponderada desde la localización de cada nodo i hasta la del siguiente, j . El cálculo de las distancias es el mismo que para la Ec. 6.1.23.

$$Eval(Sol_s) = P_{1's} + P_{2's} + P_{3's} \quad \text{Ec. 6.1.26}$$

$$P_{1's} = C_1' \cdot \sum_{i=1}^{NLN} \left(\left[\frac{1}{D_{ijA}} + \frac{1}{D_{ijL}} + \frac{1}{D_{ijS}} \right] \cdot \frac{1}{WPO_i} \right) \quad \text{Ec. 6.1.27}$$

$$P_{2's} = C_2' \cdot \sum_{i=1}^{NLN} \left(1 / \left[\frac{RS_i}{AS_p} \cdot CH_p \right] \right), \text{ node } i \text{ allocated in plant } p \quad \text{Ec. 6.1.28}$$

$$P_{3's} = C_3' \cdot \sum_{i=1}^{NLN} (1 / WL_p), \text{ node } i \text{ allocated in plant } p \quad \text{Ec. 6.1.29}$$

6.1.4.6 Nivel subordinado del algoritmo

Tras evaluar las soluciones generadas, se inicia el segundo nivel para las que obtienen mejores resultados. El segundo nivel determina de forma exacta la configuración de los transportes entre los nodos de la red logística, siguiendo el algoritmo de la Figura 35. Como se detalla en el apartado 6.1.4.3, para todas las opciones de transporte consideradas factibles entre dos puntos, se realiza una evaluación, y posteriormente se elige la mejor. Para las opciones de transporte mixto, previamente se determina la localización para la escala que dé mejores resultados. Se realiza las acciones comentadas para todos los transportes requeridos en la red.

No se va a explicar detalladamente el funcionamiento algorítmico del nivel subordinado, dado que pertenece al apartado 6.1.4.3, donde se comenta y se muestra su diagrama de flujo, en la Figura 35. Sí se considera relevante el proceso de valoración de cada opción de transporte, dado que el cálculo de los distintos valores que intervienen es complejo.

La valoración de cada opción de transporte se realiza en base al coste que representa, a la incertidumbre en el tiempo y al número de recursos que implica. Se podría pensar que se debe incluir también algún término relativo al tiempo de entrega, pero en realidad no es algo en lo que influya la cadena logística, en este modelo es un parámetro de entrada, no de salida. Es decir, se tiene un tiempo de ciclo objetivo, ya sea una condición inicial o el calculado al planificar las líneas de montaje, y el transporte se ajusta a dicho valor sin modificarlo. Lo que sí se debe incluir es la incertidumbre asociada a cada opción, pues cuanto más alta, habrá más riesgo

La puntuación de cada opción de un medio s para un transporte dado entre las plantas i y j se calcula según la Ec. 6.1.30. Es análoga a la Ec. 6.1.22 y a la Ec. 6.1.26, dado que también se basa en tres componentes. En este caso la primera componente está relacionada con el coste, la segunda con la incertidumbre del tiempo (ajustada al número de elementos) y la tercera con el número de vehículos requeridos.

Aunque, según el modelo de distribución logística planteado en la sección 5.4, el número de vehículos no influye explícitamente en el coste o el tiempo de la solución, se considera mejor un número bajo, dado que significará una inversión inicial menor o menos requisitos, si se trata de una subcontratación. Los parámetros que intervienen en cada componente se calculan siguiendo las ecuaciones Ec. 5.4.5 a Ec. 5.4.10 y Ec. 6.1.34 a Ec. 6.1.37.

$$Score_{ijs} = P_1''_{ijs} + P_2''_{ijs} + P_3''_{ijs} \quad \text{Ec. 6.1.30}$$

$$P_1''_{ijs} = C_1'' / (CoT_{ijs})^a \quad \text{Ec. 6.1.31}$$

$$P_2''_{ijs} = C_2'' / (UT_{ijs} / NE_{ijs})^b \quad \text{Ec. 6.1.32}$$

$$P_3''_{ijs} = C_3'' / (NR_{ijs})^c \quad \text{Ec. 6.1.33}$$

Las actividades involucradas en el transporte se han definido siguiendo los mismos esquemas que el resto de la metodología. Se emplea el meta modelo de productos, procesos y recursos, y se ha modelizado un transporte en el diccionario PRD como una actividad compuesta que incluye una actividad simple de carga de componentes, otra de los tipos transporte por tierra, mar o aire, y una actividad de descarga de componentes. De esta forma se consigue que se pueda realizar cálculos de tiempos, costes e incertidumbres siguiendo las reglas del sistema (como se describe en la sección 5.5), y empleando las mismas funciones.

El coste del transporte entre el nodo i y el j con el medio s se calcula mediante la Ec. 5.4.4, que emplea los parámetros coste horario del medio, tiempo de viaje, número de elementos y frecuencia del transporte, calculados a su vez mediante las ecuaciones Ec. 5.4.5 a Ec. 5.4.10.

La incertidumbre en el tiempo de transporte se calcula siguiendo la ley de propagación, tal y como muestra la Ec. 6.1.34. Las incertidumbres en las operaciones de carga y descarga, UTI y UTu, se calculan según el modelo general, donde se emplea un conjunto de valores tabulados para la incertidumbre de cada tipo de actividad para un recurso dado y un único elemento. La incertidumbre debida exclusivamente al transporte se calcula también mediante un valor tabulado de la incertidumbre relacionada con cada medio de transporte concreto.

$$UT_{ijs} = \sqrt{UTl_{ijs}^2 + (UM_s \cdot D_{ijs})^2 + UTu_{ijs}^2} \quad \text{Ec. 6.1.34}$$

El número de recursos requeridos, NR se deduce de la inecuación Ec. 6.1.35. Se emplea el cociente del tiempo de ida y vuelta, TJR, y la relación entre el tiempo de ciclo y el número de elementos (Ec. 6.1.36). El tiempo de ida y vuelta se calcula según la Ec. 6.1.37, mediante el tiempo de transporte completo y el tiempo de vuelta, que coincide con el valor del tiempo de viaje ajustado con un coeficiente KE por ir sin carga el vehículo.

$$TJR_{ijs} \leq NR_{ijs} \cdot NE_{ijs} \cdot TC \quad \text{Ec. 6.1.35}$$

$$NR_{ijs} = \text{Int} \left(\frac{TJR_{ijs}}{NE_{ijs} \cdot TC} \right) + 1 \quad \text{Ec. 6.1.36}$$

$$TJR_{ijs} = TJ_{ijs} + KE \cdot TM_{ijs} \quad \text{Ec. 6.1.37}$$

Seguindo las ecuaciones descritas, se puede evaluar todas las opciones disponibles para cada transporte requerido. Así, se puede elegir la que obtenga mejores resultados en cada caso. Una vez determinado el transporte para las soluciones mejor valoradas de la iteración, estas deben ser evaluadas de forma completa, para determinar cuál es la mejor de ellas y el incremento del nivel de feromonas que se le aplicará.

6.1.4.7 Evaluación de soluciones completas y actualización global de feromonas

Para que un algoritmo de tipo ACO funcione y se converja a soluciones cercanas al óptimo, es fundamental el mecanismo de evaluación y actualización de feromonas. La evaluación de una solución completa según el método diseñado se basa en la estimación de propiedades del proceso de montaje completo, incluyendo todos los transportes y líneas de montaje.

Según el método que se propone, en la evaluación tendrá mucho peso la configuración de los transportes, a pesar de determinarse en el nivel subordinado. También tendrá importancia el coste asociado a la elección de cada localización. Cada planta tiene un coste horario de utilización, pero además el coste de los procesos asociados se puede encarecer debido al nivel de los salarios en esa región.

Para poder actualizar el nivel de feromonas, debe haberse creado previamente el conjunto de arcos que representan la elección de una localización cuando se eligió en la decisión previa una localización concreta. Habrá tantos arcos como el número de localizaciones al cuadrado, puesto que una misma planta puede elegirse más de una vez y de forma consecutiva. Las feromonas se almacenan en una matriz que representa el conjunto de arcos.

El incremento de feromonas para una solución s , $\Delta\tau_{ij|s}$, se calcula siguiendo la Ec. 6.1.38. De se consideran varias componentes. La primera (Ec. 6.1.39) suma todos los costes de los nodos de la red, incluyendo los costes no logísticos si ya se han calculado o el término CP* (Ec. 5.4.3) si aún no, para así tener en cuenta en la evaluación el nivel de salarios. Se toma como nivel base, WL₀, el salario mínimo en España (considerado 648€).

La segunda componente está relacionada con el tiempo total, calculado con la Ec. 6.1.43, de acuerdo con lo expuesto en el apartado 5.5.5.1.

La tercera incluye la relación entre el tiempo de ciclo y la incertidumbre, que se calcula como la incertidumbre máxima de los transportes, aunque está limitada superiormente por la incertidumbre del tiempo de ciclo (Ec. 6.1.44).

$$\Delta\tau_{ij}|_s = (P_{C1s} + P_{C2s}) \cdot P_{C3s} \quad \text{Ec. 6.1.38}$$

$$PC_{1s} = CC_{1s} \cdot C^{*-1} \quad \text{Ec. 6.1.39}$$

$$PC_{2s} = CC_{2s} \cdot TT^{-1} \quad \text{Ec. 6.1.40}$$

$$PC_{3s} = \frac{TC - UTC^*}{TC} \quad \text{Ec. 6.1.41}$$

$$C^* = \begin{cases} \sum_{i=1}^{NLN} [CoT_{ijs} + CP_i + CnoT_i], & CnoT_i \neq 0 \\ \sum_{i=1}^{NLN} [CoT_{ijs} + CP^*_i], & CnoT_i = 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 6.1.42}$$

$$TT = (BNS_f|_{f=FAL}) \cdot TC \quad \text{Ec. 6.1.43}$$

$$BNS_k = MAX_l^{NPrk} (NS_{kl} + BNS_l + NoS_l + 1) \quad \text{Ec. 6.1.44}$$

$$UTC^* = (MAX\{MAX_{ij}(UT_{ijs}), UTC\})^{-1} \quad \text{Ec. 6.1.45}$$

Se calcula el incremento de feromonas para las soluciones del primer nivel seleccionadas, y se selecciona y almacena la que obtiene el mayor resultado. Luego se actualizan sus feromonas según la Ec. 6.1.11. y se repite el ciclo con una nueva iteración. Una vez termina el algoritmo, se define la solución con mejores resultados.

6.1.5 Pruebas realizadas y configuración adoptada

En el apartado anterior se ha detallado el método para la optimización de la red logística tal y como se diseñó. Se definieron un conjunto de algoritmos y de ecuaciones para la creación del sistema de optimización basado en la meta heurística ACO. Una vez concluido el diseño, se debe realizar una serie de pruebas para comprobar su eficacia. Varios parámetros, incluso, se definen únicamente de manera provisional, contemplando su posible modificación según los resultados obtenidos en las pruebas.

No obstante sí ha sido posible efectuar pruebas del sistema programado como primer prototipo, empleando un modelo de producto sencillo

6.1.5.1 Determinación de parámetros del Algoritmo

Para la programación de un primer prototipo según el diseño del método ACO descrito anteriormente, se ha requerido determinar diversos parámetros para obtener un correcto funcionamiento. Una parte de dichos parámetros se corresponden con valores de constantes dentro de funciones de evaluación de distintos aspectos de la cadena logística. Para determinar unos valores adecuados ha bastado con realizar varias ejecuciones paso a paso de la generación de una solución, y comprobar la eficacia de cada evaluación con un valor determinado. Los valores finalmente establecidos para estas constantes son los siguientes.

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

$C_1 = C_2 = C_3 = 1$	Ec. 6.1.46	$C'_1 = 1/10$	Ec. 6.1.47
$C'_2 = 10/75$	Ec. 6.1.48	$C'_3 = 10/12.5$	Ec. 6.1.49
$C''_1 = 1500$	Ec. 6.1.50	$C''_2 = 8$	Ec. 6.1.51
$C''_3 = 2$	Ec. 6.1.52	$a = 1$	Ec. 6.1.53
$b = 2$	Ec. 6.1.54	$c = 2$	Ec. 6.1.55
$CC_{1s} = 10^7$	Ec. 6.1.56	$CC_{2s} = 5000$	Ec. 6.1.57

Por otra parte, el método desarrollado requería un conjunto de parámetros funcionales para una correcta ejecución del mismo, evitando efectos indeseables como Estancamiento (St), Convergencia Prematura (CP) o Convergencia Lenta (CL). Se ha requerido dar valores a los parámetros α , β , q_0 and τ_0 , que, respectivamente, se corresponden con los exponentes del nivel de feromonas en una posible decisión y de la valoración local de la misma, la probabilidad de elegir la opción con mayor valoración local frente a una con un componente aleatorio y el nivel inicial de feromonas.

A pesar de las limitaciones en el uso de la memoria que la plataforma de implementación imponía, que se describen en el siguiente apartado, ha sido posible realizar unas pruebas con un ejemplo de producto. Únicamente se ha podido realizar ejecuciones con un número de iteraciones no mayor de 500, para un producto de estructura sencilla, lo cual es significativamente menor que las 1000 que se recomienda en esta clase de algoritmos [40]-[43][49][50]

Los modelos de producto empleados en las pruebas del sistema para la determinación de parámetros se muestran en las figuras Figura 38 y Figura 39. Se trata de dos estructuras distintas, que se han denominado A y B, de un mismo producto: el ala derecha de un avión, que consta de 9 componentes. Los ejemplos constan de 1 y 3 sub montajes respectivamente, lo que se corresponderá con dos redes logísticas completamente diferentes. En la Figura 39 se muestra la maqueta digital del producto, y se destaca los componentes individuales asignados como hijos directos del nodo principal.

Para los experimentos se emplearon las mismas condiciones iniciales que para los casos de estudio realizados, que se exponen en el Capítulo 9 e incluyen 21 localizaciones industriales disponibles y 5 posibles medios de transporte, de tipos aéreo, marítimo y terrestre.

Se probaron diversas configuraciones de parámetros para las dos estructuras de producto de ejemplo. En este caso se conocía de antemano la configuración óptima de la cadena logística en términos de coste y tiempo para cada estructura. La Tabla 21 y la Tabla 22 muestran la solución óptima para las dos estructuras de ejemplo respectivamente. Se indica el tipo de nodo, Origen (O) o Industrial (IN); el nombre del componente o sub montaje, la localización (Loc.) y el medio de transporte (Tr.) al siguiente nodo de la red.

Dados los transportes de componentes requeridos y los posibles orígenes de algunos componentes, se determina que la configuración óptima implica que los componentes individuales se produzcan en Porstmouth y Brighton y se localicen las plantas de montaje en esta última, y el medio de transporte indicado será por tierra, un camión de transporte.

Figura 38: estructura A del modelo empleado para las pruebas.

Figura 39: estructura B del modelo empleado para las pruebas.

Se realizó una serie de experimentos con distintos valores de α , β , q_0 y τ_0 , buscando un adecuado equilibrio entre las facetas de explotación y exploración del método. El número de iteraciones se fijó inicialmente en 500, debido a las limitaciones impuestas por el entorno, pero se hubo de reducir a 400 para los experimentos con la estructura de producto B y feromonas iniciales de 10000, por tener mayor complejidad de cálculo. La Tabla incluye en sus filas los experimentos más representativos, con la estructura probada (I.N.), el número de iteraciones (N_{it}), los mencionados parámetros del sistema y un compensador Ps' que multiplica a la evaluación local para darle más peso dentro del algoritmo. En la columna final se incluye el tipo de respuesta obtenida.

Se realizaron 3 experimentos sobre la estructura A, principalmente variando la relación α - β . La mejor actuación se obtuvo para una relación 1:2, mientras que ratios 1:3 y 1:5 implicaron una convergencia prematura (CP). Los experimentos 4 a 22 se efectuaron sobre la estructura B. Se comenzó probando con la configuración del Exp. 1, que funcionó bien para el caso A, pero implicaba fenómenos de CP al usarse sobre B. En el Exp. 5 se probó a potenciar la aleatoriedad de las elecciones para aumentar la exploración, pero se obtuvo una CP aún más pronunciada. Se intentó compensar de otro modo, incrementando a 10000 las feromonas iniciales (τ_0), pero ello repercutió en un fallo en la ejecución por falta de memoria, por lo que se redujo el número de iteraciones a 400. En el Exp. 7 se obtuvo un efecto de estancamiento (St), pues el sistema convergió a una solución inferior a la óptima.

Para evitar el estancamiento anterior, los resultados de las evaluaciones locales se multiplicaron por un factor adicional, denominado Ps' , para incentivar la exploración. Esta medida compensó el efecto pero volvió el sistema muy oscilatorio, obteniendo efectos de convergencia lenta (CL). Si bien se exploraba el espacio de soluciones de forma efectiva, el sistema no convergía hacia las de mayor calidad sino que oscilaba. Se probó a variar τ_0 , a 5000 en el Exp. 9 y luego a 1000 en el Exp. 10 con respuestas similares. Al disminuir Ps' se retornó a efectos de CP agudos (Exp. 11). Al variar β hasta 3 la respuesta fue de tipo CL moderada (Exp. 12), y se decidió mantener esa configuración modificando lentamente el multiplicador Ps' y con τ_0 de valor 10000. Se probaron valores de 75, 50, 25, 10 y 1 para Ps' y únicamente se obtuvieron respuestas lentas, aunque de carácter moderado las últimas (experimentos Exp. 13 a Exp. 18)

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

En los experimentos Exp. 19 a 21 se volvió a la configuración del Exp. 7, aumentando el nivel de τ_0 . El valor de 10000 implicaba CP y el de 20000 CL. Al probar 15000 se obtuvo una respuesta adecuada del sistema, mostrada en la Figura 40(Exp. 21). Un valor de 2 y 3 para α y β en esas condiciones empeoró la respuesta a CP (Exp. 22).

Node Type	S. Assy/ Comp.	Loc.	Tr.
IN	Right Wing A400M1	Bg	-
O	RWT	Po	LT1
O	RWB1	Po	LT1
O	RWB2	Po	LT1
O	RWF1	Bg	-
O	RWF2	Bg	-
O	RWF3	Bg	-
O	RWS1	Bg	-
O	RWS2	Bg	-
O	RWS3	Bg	-
Total Score		7345,86	

Tabla 21: Solución óptima para la estructura A.

Node Type	S. Assy/ Comp.	Loc.	Tr.
IN	Right Wing A400M1	Bg	-
O	RWF2	Bg	-
O	RWS2	Bg	-
IN	Inner Right Wing	Bg	-
IN	Outer Right Wing	Bg	-
O	RWB1	Po	LT1
O	RWF1	Bg	-
O	RWS1	Bg	-
O	RWB2	Po	LT1
O	RWF3	Bg	-
O	RWS3	Bg	-
O	RWT	Po	LT1
Total Score		7436,54	

Tabla 22: Solución óptima para la estructura B.

Exp.	I.N.	N_{it}	α	β	q_0	τ_0	$Ps'(\_)$	Ans.
1	A	500	1	2	0.9	100	1	OK
2	A	500	1	3	0.9	100	1	CP
3	A	500	1	5	0.9	100	1	CP
4	B	500	1	2	0.9	100	1	CP
5	B	500	1	2	0.6	100	1	CP+
6	B	500	1	2	0.9	10000	1	---
7	B	400	1	2	0.9	10000	1	St
8	B	400	1	2	0.9	10000	100	CL+
9	B	400	1	2	0.9	5000	100	CL+
10	B	400	1	2	0.9	1000	100	CL+
11	B	400	1	2	0.9	1000	75	CP+
12	B	400	1	3	0.9	1000	100	CL-
13	B	400	1	3	0.9	10000	75	CL
14	B	400	1	3	0.9	10000	50	CL
15	B	400	1	3	0.9	10000	25	CL
16	B	400	1	3	0.9	10000	10	CL-
17	B	400	1	3	0.9	10000	5	CL-
18	B	400	1	3	0.9	10000	1	CL-
19	B	400	1	2	0.9	10000	1	CP
20	B	400	1	2	0.9	20000	1	CL-
21	B	400	1	2	0.9	15000	1	OK
22	B	400	2	3	0.9	15000	1	CP
23	A	500	2	3	0.9	15000	1	CL+
24	A	500	1	2	0.9	15000	1	CL+
25	A	500	1	2	0.9	10000	1	CL+
26	A	500	1	2	0.9	500	1	CL-
27	A	500	1	2	0.9	200	1	OK

Tabla 23: configuraciones de parámetros probadas.

Se probó la configuración del Exp. 21 y el Exp. 22 en el ejemplo A, de nuevo con 500 iteraciones, pero se obtuvo una respuesta muy oscilatoria en ambos casos (Exp. 23 y Exp. 24). Se probó a disminuir el nivel de τ_0 y para un valor de 200 se obtuvo una respuesta adecuada (Exp. 27).

Como conclusión, los experimentos ponen de manifiesto que las configuraciones más adecuadas para obtener una buena respuesta del sistema vienen dadas por los valores 1, 2, 0.9 y 1 para los parámetros α , β , q_0 y Ps' , respectivamente. El valor de τ_0 se deberá ajustar para cada caso concreto.

Figura 40: Puntuaciones de las 2 mejores soluciones u "hormigas" de 400 iteraciones para la estructura A del Exp. 21.

6.1.5.2 Limitaciones para la ejecución del Algoritmo

La programación del primer prototipo de sistema de optimización meta heurística para la red logística no ha sido sencilla. En el transcurso de esta tarea han quedado de manifiesto una serie de obstáculos que no se previeron en la etapa de diseño y que han obligado a realizar modificaciones en el método. A continuación se describirán los principales problemas encontrados, se mostrarán unos resultados que los señalen y se detallará la solución adoptada en cada caso.

El principal obstáculo que se ha encontrado para la implementación del método tal y como se diseñó, ha sido debido al medio del que se disponía para el desarrollo del código. La implementación de la metodología se ha llevado a cabo en el entorno VBA que incorpora la aplicación CATIA V5. La aplicación impone un límite de la memoria que se puede utilizar. En las pruebas realizadas se ha comprobado que dicho límite permite la generación de una cantidad total de hormigas reducida, unas 3000 en total, dependiendo del número concreto de atributos de cada clase empleada.

La falta de memoria ha tenido como consecuencias otros problemas que han interferido en lograr los resultados esperados de la aplicación del método. La consecuencia más directa ha sido problemas de convergencia: al no poder ejecutarse un número suficiente de iteraciones, las soluciones generadas no convergían hacia un valor final, o bien convergían a un valor no óptimo, en lo que se conoce como convergencia prematura. Este comportamiento es consecuencia directa de el bajo número de iteraciones que se pueden ejecutar, dado que en otros trabajos se ha usado un número del orden de 1000 para lograr una adecuada convergencia del sistema [42][47][49].

6.2 Lógica Borrosa

El segundo apartado del capítulo se ha dedicado a la explicación del método desarrollado para cubrir la función de la metodología en la que se evalúa una solución completa para el diseño conceptual del proceso de montaje. Dicho método consiste en la aplicación de un sistema basado en la Lógica Borrosa.

Los resultados de la ejecución de la evaluación de una solución serán, por un lado, una puntuación numérica de la misma. Dicho valor permitirá comparar varias alternativas diferentes. Por otro lado, el proceso de evaluación también incluye la determinación de diversos parámetros del proceso de montaje que pueden servir al usuario para valorar una solución en su conjunto. Entre dichos parámetros se encuentra el tiempo de ciclo del proceso, el tiempo de entrega, los costes totales, los costes asociados al transporte y la eficiencia en el uso de los recursos del proceso.

En este apartado se expondrá las características buscadas para la fase de la metodología relativa a la evaluación de soluciones; se describirá brevemente los fundamentos de la Teoría de la Lógica Borrosa, incluyendo las variantes existentes y el porqué de la elección de ese tipo de sistemas y por último se explicará el método final desarrollado.

6.2.1 La evaluación en la metodología propuesta

Se ha expuesto que la metodología que se propone está orientada a la obtención de soluciones conjuntas de calidad para los problemas acoplados que componen el diseño inicial de la Industrialización, siempre según el modelo incluido como parte de la misma metodología, detallado en el 0. Para poder validar las soluciones obtenidas, es necesario un proceso que obtenga una medida de las mismas según parámetros que sean indicadores de calidad. Dado el campo de aplicación, estrechamente relacionado con la producción industrial, los criterios empleados han sido tiempos y costes.

No obstante, la evaluación de las soluciones descritas no es una tarea sencilla. Se debe tener presente que se trata de posibles soluciones del proceso de montaje, es decir, entidades de una complejidad elevada. A pesar del modelo PPR sencillo que se ha desarrollado como demostrador, y del bajo nivel de detalle debido a la etapa de definición hacia la que se orienta la metodología, cada instancia de solución engloba un alto número de elementos, como nodos industriales, transportes, plantas, estaciones, recursos o actividades, todos ellos con unas propiedades que contribuyen de una forma u otra a los valores finales de características como el coste o el tiempo de ciclo.

Por otro lado, se ha discutido en el apartado 2.5 que los sistemas para evaluaciones multi criterio, para obtener una valoración a partir de múltiples variables de entrada, no se pueden definir de forma trivial [53][54][57][58]. La creación de una función escalar, lineal o no, mediante la que se obtenga un valor teniendo en cuenta unos pesos relativos de los distintos parámetros puede ser una solución. Sin embargo, eso plantea el problema de definir los pesos relativos, y en base a ellos, unos valores para los coeficientes de la función.

Esta opción, una función escalar con varias entradas, ha sido seleccionada para las evaluaciones multi criterio que se han requerido para el método meta heurístico implementado para obtener soluciones del sub problema de la definición de la red logística. Sin embargo, en ese caso únicamente se requería un método que permitiese determinar la mejor solución de entre un grupo de ellas. Para la evaluación de soluciones completas, además es necesario una valoración que sea de por sí interpretable, como por ejemplo una puntuación del 1 al 10. Se ha buscado que sea posible evaluar una única solución y obtener una idea clara de su nivel de calidad.

El bajo nivel de definición del proceso en las etapas para las que se plantea la metodología se ha mencionado como una posible causa de simplicidad de las soluciones, lo que facilitaría su evaluación. Sin embargo, en realidad puede suponer una complicación adicional. El bajo nivel de detalle implica que la precisión de cada medida sea muy baja, lo que puede desembocar en valores muy alejados de la realidad si se desarrolla la alternativa en cuestión. Ello hace que no sea viable, por ejemplo, la comparación con datos históricos de líneas de montaje desarrolladas, puesto que dichos datos provendrían de soluciones finales que incluirían aspectos no contemplados en el modelo propuesto. Se obtendría, probablemente, que las soluciones definidas mediante la metodología son siempre significativamente más baratas que las registradas en el historial.

Por tanto, el problema de la evaluación de soluciones completas presenta diversas complicaciones que se deben superar. Concretamente se ha enunciado la complejidad de los cálculos necesarios para determinar unos valores totales de tiempos y costes, la dificultad de definir un sistema evaluador multi criterio, para lo que se ha excluido la posibilidad de una función escalar, y las imprecisiones derivadas del bajo nivel de definición de la industrialización debido a la etapa del ciclo de vida. De todas ellas, la primera se considera superada, dado el modelo de costes y tiempos descrito en el apartado 5.5. Mediante dicho modelo, que se ha formalizado en un sistema de ecuaciones, es posible determinar los valores totales requeridos.

Las complicaciones mencionadas han determinado que finalmente se opte por un sistema basado en la Lógica Borrosa (Fuzzy Logic ó FL). Algunas de las características de esta forma de son especialmente adecuadas para lidiar con dichos obstáculos. Por ejemplo, se considera probado que la FL permite definir una base de conocimiento de forma intuitiva mediante conceptos lingüísticos, que luego se combinan internamente para obtener unas salidas a partir de unas entradas [71]-[73][75]-[77]; lo cual se puede emplear como sistema evaluador multi criterio, si se formula de la manera adecuada. Con ello se superaría dicha dificultad.

En cuanto a la imprecisión de los valores debido al estado de desarrollo del proyecto de industrialización, el uso de la FL también se considera adecuado para ello, dado que una de las características fundamentales de la FL es la posibilidad de modelizar empleando conceptos vagos, ambiguos o imprecisos[73]. No obstante, la incertidumbre es un concepto que se ha tenido muy en cuenta en el modelo, y se incluye de forma explícita en el sistema evaluador.

En los próximos apartados, se describirá la Teoría de la Lógica Borrosa, para la comprensión del método final desarrollado, el cual se describirá a su vez más adelante.

6.2.2 La lógica Borrosa

El sistema de evaluación desarrollado como parte de la metodología está basado en la Teoría de la Lógica Borrosa (Fuzzy Logic o FL). Para una adecuada explicación de dicho sistema se considera necesario, por tanto, una descripción previa de la teoría en general. Así se planteará los conceptos básicos relacionados que luego se emplearán para la exposición detallada del método concreto finalmente desarrollado.

La Teoría de la Lógica Borrosa fue desarrollada en la década de los 30 del siglo XX por Lukasiewicz, pero su aplicación a problemas de ingeniería se planteó por primera vez por Zadeh en los 70. El objetivo que se persiguió con su formulación fue la creación de un sistema matemático que permitiera modelizar una mecánica similar a la que sigue el cerebro humano para procesar y seleccionar palabras [57][71]-[74].

De hecho una de sus características más valoradas es la posibilidad de modelar el funcionamiento interno del sistema mediante expresiones naturales, definiendo reglas mediante variables lingüísticas, como por ejemplo “Malo”, “Regular” o “Muy alto” [73].

La FL se puede entender como una generalización de algunas reglas de la lógica tradicional booleana. Según la lógica tradicional, un elemento tiene que pertenecer a un conjunto según un valor booleano; por ejemplo, la proposición " x pertenece a A ", únicamente podría tener dos valores posibles: "*VERDADERO*" o "*FALSO*". Según la FL, un elemento puede pertenecer a un conjunto según un valor real entre 0 y 1. Cada conjunto definido según la FL, denominado conjunto borroso, tiene asociada una función de pertenencia que relaciona el valor de una variable que pertenezca a ese dominio con un grado de pertenencia.

Ello permite asociar a valores matemáticos conceptos representados por los conjuntos borrosos. Eso también es posible empleando la lógica booleana, pero en ese caso existe siempre la duda de si el valor completo se podía englobar de forma categórica dentro del conjunto en cuestión. Según la FL, también es posible que una variable pertenezca grado a dos conjuntos de forma simultánea, aunque el grado de pertenencia no tiene que ser el mismo para cada uno.

Cuando se tiene un conjunto de valores matemáticos expresados según su pertenencia a conjuntos borrosos, designados mediante conceptos lingüísticos, es posible aplicar reglas de razonamiento que anteriormente no se podían incluir en sistemas matemáticos, o al menos no de una forma eficaz.

La FL permite muchos tipos distintos de desarrollos. Por ejemplo, se ha definido un tipo de número denominado números borrosos. Los números pertenecientes a esta categoría se definen mediante los parámetros que determinan la configuración de una función de pertenencia, como si fueran conjuntos borrosos. Se ha definido también un conjunto de operaciones básicas entre números borrosos, equivalentes a la suma y la resta convencionales, y un producto por números reales. Muchos razonamientos matemáticos se pueden reinterpretar mediante el uso de números borrosos[76], lo que hace el número de posibilidades muy amplio.

Aún así, la forma más extendida de aplicar la FL es empleando el Algoritmo Borroso. Se trata de un proceso que implica la determinación de unas salidas en función de unos valores de entrada, por lo que se ha empleado en muchos casos como sistema de evaluación multi criterio. El algoritmo incluye un proceso de borrosificación, en el que se determinan los conjuntos borrosos activados por cada valor de entrada; la aplicación de las reglas internas definidas según la pertenencia a los conjuntos; y un proceso de desborrosificación según el grado de pertenencia a los conjuntos dictados determinados las reglas.

Previamente al desarrollo del sistema de evaluación de soluciones, se ha realizado una revisión del estado del arte en cuanto a la aplicación de sistemas basados en la FL. Dicho estudio se expone en la sección 2.5. Se puede resumir que este tipo de métodos se ha aplicado con resultados positivos a aspectos del diseño de la industrialización, como la evaluación de la cadena de suministro [57][58][62], la definición de la línea de montaje [52][75][77] o el reparto de la producción [76]. También se ha empleado la FL en otros ámbitos de la ingeniería de fabricación, como el análisis de modos de fallo [78], y en otros campos distintos como la economía [79][82], el desarrollo de software [74] o la construcción [81].

A continuación se explicará diversos aspectos de la teoría. Se describirá sus principios básicos, el algoritmo estándar usado para su aplicación, las posibles variantes y una justificación de la elección de este tipo de métodos.

6.2.2.1 Principios básicos

La FL se apoya en gran medida en la idea de la pertenencia a un conjunto en un grado medio que se encuentre en algún punto entre la pertenencia absoluta (que estaría representada por el valor 1) y la no pertenencia (valor 0). Se denominan conjunto borroso a un grupo o categoría de elementos que tiene una frontera gradual, es decir, con un paso continuo desde el valor de no pertenencia al de máxima pertenencia.

El rango de valores de un parámetro que se desea clasificar empleando la FL se denomina universo de discurso. Para que se pueda realizar la clasificación, el universo de discurso debe estar poblado por un número de conjuntos borrosos que representen las distintas categorías posibles. De esa forma, cualquier posible valor del universo de discurso de una variable debe estar asociado a un nivel de pertenencia no nulo de al menos a un conjunto borroso. La función de pertenencia de un conjunto borroso relaciona el rango de valores del universo de discurso con valores de pertenencia a dicho conjunto.

Se puede describir matemáticamente una función de pertenencia a un conjunto borroso como $m: [0,1] \leftarrow DU(\mathbb{R})$. Dado que según la definición un conjunto borroso posee una frontera gradual, se impone la condición de que m sea continua en todo su dominio. DU° representa el universo de discurso de la variable en cuestión. Dicho universo de discurso es un subconjunto de la recta de números reales, y es habitual que sea coincidente con esta[73].

Otro aspecto fundamental de la FL es la posibilidad de emplear variables definidas lingüísticamente para modelar el sistema. Por ejemplo, la temperatura, en un sistema borroso se podría valorar según las clasificaciones “Muy fría”, “Fría”, “Agradable”, “Calurosa” y “Muy calurosa”. Estas clasificaciones escapan en muchas ocasiones a cualquier lenguaje matemático o científico, pero gracias a la FL se pueden incluir dentro del sistema y usarse para definirlo. Se puede definir el término variable lingüística como aquella que admite valores de carácter lingüístico frente a la variable numérica clásica.

El elemento interno para definir las salidas necesarias a partir de las entradas se denomina motor de inferencia. Está compuesto por un conjunto de normas que relacionan las posibles combinaciones de clasificaciones borrosas de las entradas con unas salidas, que pueden ser unas categorías de las variables de salida. Las reglas del motor de inferencia se definen con la estructura “SI <antecedente> ENTONCES <consecuente>”. Por ejemplo, “SI la temperatura del interior es Muy Fría, ENTONCES encender la calefacción a nivel Alto”.

Estos principios se han aplicado repetidas veces para evaluar un conjunto de parámetros, y en algunos casos determinar después unas acciones a realizar [73][75]-[77][79]-[82]. Para ese tipo de usos de la FL, se desarrolló el denominado algoritmo borroso, que especifica los pasos para obtener las salidas buscadas a partir de un número de entradas.

6.2.2.2 El Algoritmo Borroso

Lo más habitual al aplicar la FL es emplear el Algoritmo Borroso, desarrollado por Zadeh en 1968 [71][72][73][76]. Se busca aplicar las reglas definidas en el motor de inferencia, pero estas sólo admiten variables lingüísticas, por lo que se requiere un proceso en el que se definan unas equivalentes a las variables numéricas de entrada, con los valores lingüísticos correspondientes. Tras aplicar las reglas, las salidas resultantes se pueden reconvertir en variables numéricas. El algoritmo se compone, por tanto, de 3 pasos fundamentales, que se ejecutan consecutivamente. Se trata de los procesos de borrosificación, activación de reglas y desborrosificación.

Para explicar el funcionamiento del Algoritmo Borroso y exponer de forma más clara todos los conceptos ligados a la FL, se ha elaborado un ejemplo muy sencillo. Se trata de un modelo borroso para el control automático de un sistema de aire acondicionado doméstico, que usaría como entradas la temperatura exterior e interior de la vivienda; y cuya salida sería el incremento adecuado del termostato. Se comentará cada uno de los pasos del algoritmo y su correspondencia con el modelo de ejemplo.

El proceso de borrosificación tiene el objetivo de obtener una valorización lingüística de las variables de entrada. Para su realización, es necesario que el universo de discurso de cada variable de entrada esté asociado a un número de conjuntos borrosos cuya función de pertenencia asocie a cada posible valor un grado de pertenencia. Para que se pueda emplear el motor de inferencia correctamente, es necesario que para al menos uno de los conjuntos del universo de discurso, cada variable de entrada tenga una pertenencia mayor que 0.

Una característica habitual en sistemas basados en la FL es que los conjuntos definidos para cada universo de discurso se solapen entre sí. De esa forma se potencia la característica del método de incluir en el modelo la ambigüedad del sistema físico, real. Así, el valor de una variable muy probablemente se asocie con dos conjuntos borrosos distintos [73]. En el ejemplo propuesto, una temperatura interior de 28 °C tendrá una alta pertenencia al conjunto “Hot” (Cálida), pero también un valor no nulo de pertenencia a “Comfortable” (Cómoda).

Para el ejemplo del control del aire acondicionado se han definido 7 conjuntos borrosos, mostrados en la Figura 41. Se observa que se han definido valores para las dos entradas del sistema. La variable T_i , correspondiente a la temperatura interior, de valor 17.1 °C, se asocia a dos conjuntos borrosos, “Cold” y “Comfortable”, con valores de pertenencia de 0.29 y 0.71 respectivamente. La temperatura exterior, T_o , tiene un valor de 10.44 °C y tiene una pertenencia de 0.956 y 0.044 a los mismos conjuntos, respectivamente.

La activación de las reglas del motor de inferencia consiste en el repaso de todas las que estén definidas y determinar los conjuntos y grados de activación que se obtiene según cada una. Como se ha comentado previamente, habitualmente las reglas se definen siguiendo una sintaxis de tipo “IF-THEN” que relaciona cada posible combinación de valores de la pertenencia de los conjuntos de entrada con una combinación de valores para los de salida. En el ejemplo propuesto, dos de las reglas serían:

- *Si la temperatura interior es Cálida (H) Y la temperatura exterior es Extremadamente Baja (EL), ENTONCES el incremento del termostato será Nulo (Z).*
- *Si la temperatura interior es Cómoda (Cm) Y la temperatura exterior es Extremadamente Baja (EL), ENTONCES el incremento del termostato será Positivo (P).*

Dado que el sistema del ejemplo se ha definido con 2 variables de entrada y 1 de salida, el total de reglas del motor de inferencia se puede expresar como una tabla de valores. La Tabla 24 recoge dicho conjunto de reglas, cada casilla de la tabla representa un valor posible de las variables de entrada, y el valor de la variable de salida. Las dos reglas enunciadas anteriormente se han destacado en color anaranjado en la Tabla 24.

Como se puede observar, dado que existen 7 conjuntos borrosos para las 2 variables de entradas, existirán $7^2=49$ reglas, según las combinaciones posibles. Para sistemas con un número mayor de variables de entrada, el número de reglas puede hacerse suficientemente elevado como para complicar su manejo, por lo que una práctica habitual en esos casos es su reducción mediante la eliminación de reglas, bien por falta de sentido físico [78], bien porque se ha demostrado que su contribución al resultado final es despreciable [57]. En el ejemplo, se podría estudiar eliminar las reglas relacionadas con valores muy altos de la temperatura exterior y muy bajos de la interior, dado que físicamente es poco probable que se den.

Figura 41: pertenencia de una variable a distintos conjuntos borrosos.

Los posibles valores de la variable de salida, el incremento del termostato, serían VN, N, L, Z, LP, P y VP, que significan, respectivamente, “Muy Negativo”, “Negativo”, “Ligeramente Negativo”, “Nulo”, “Ligeramente Positivo”, etc. Dados los valores de las variables de entrada, las reglas activadas serían las representadas en las casillas, según la forma (T_o, T_i) , (C,C) , (C,Cm) , (Cm,C) y (Cm,Cm) , destacadas en verde en la Tabla 24.

$T_i \backslash T_o$	EL	L	HC	C	Cm	H	EH
EL	VP	VP	VP	VP	P	Z	Z
L	VP	VP	VP	P	LP	Z	Z
HC	VP	P	P	P	LP	Z	Z
C	VP	P	P	P	LP	Z	N
Cm	P	P	LP	LP	Z	LN	N
H	LP	LP	LP	Z	LN	N	N
EH	LP	LP	Z	Z	LN	N	VN

Tabla 24: reglas del motor de inferencia del ejemplo propuesto.

Se debe determinar el grado de activación de cada una de las reglas, que es lo que determinará la pertenencia a los conjuntos de salida. El grado de activación se determina siguiendo una norma o una conorma triangulares (t-norma o s-norma, respectivamente), es decir, aplicaciones $t: [0,1] \leftarrow [0,1] \times [0,1]$ que verifican una serie de condiciones. Las t-normas cumplen los principios de no decrecimiento en sus argumentos, conmutatividad y asociatividad; las s-normas, además de todo lo anterior, cumplen que asocian un valor de 0 si un argumento es nulo y un valor de 1 si un argumento vale 1.

Las ecuaciones Ec. 6.2.1 y Ec. 6.2.2 expresan las t-normas de Mamdani o del Mínimo y de Larsen o del Producto, respectivamente. Las variables μ_{RM} y μ_{RP} expresan, según ambos métodos, la pertenencia al conjunto de salida asociado a la regla R, relacionada con los conjuntos de entrada A y B, a partir de los valores de pertenencia de las variables de entrada x e y a dichos conjuntos, respectivamente. Otros ejemplos de normas empleadas en la FL son las de Reichenbach, Lukasiewicz, Willmott y Brouwer-Gödel [73].

$$\mu_{RM}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad \text{Ec. 6.2.1}$$

$$\mu_{RP}(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \quad \text{Ec. 6.2.2}$$

El Algoritmo Borroso se programa habitualmente usando la t-norma del Mínimo, por su facilidad de implementación y su sentido físico[73]-[79][82]. En el sistema regulador de temperatura, se ha seguido este método, por lo que, siguiendo con el ejemplo expuesto, el grado de activación para las reglas activadas será:

$$\begin{aligned} \mu_p &= \min(0.956, 0.29) = 0.29 \\ \mu_{LP} &= \min(0.956, 0.71) = 0.71 \\ \mu_{LP}' &= \min(0.044, 0.29) = 0.044 \\ \mu_z &= \min(0.044, 0.71) = 0.044 \end{aligned}$$

Es la activación generada por los pares (C,C),(C,Cm),(Cm,C) y (Cm,Cm), respectivamente. Esa información será la entrada al proceso de composición de la pertenencia de las variables de salida para su posterior borrosificación.

La tercera etapa del algoritmo es la desborrosificación, es decir, convertir los valores de pertenencia de cada variable de salida a los conjuntos de su universo en un valor numérico. Previamente es necesario realizar una composición de todos los valores de pertenencia a los conjuntos borrosos de salida. Se puede apreciar que los resultados obtenidos implican valores de pertenencia distintos para mismos conjuntos de salida. Para determinar la pertenencia de la variable existen las denominadas reglas de composición. El objetivo es determinar el perfil de una función continua y cuyo dominio sea el universo de discurso, y que incorpore la información obtenida del motor de inferencia. La Figura 42 muestra un ejemplo del perfil de una función de pertenencia total.

Las principales reglas de composición se denominan Sup-Min, Inf-Max y Sup-Producto, y se expresan matemáticamente según las ecuaciones Ec. 6.2.3 a Ec. 6.2.5, respectivamente[73]; donde μ_c es el perfil de pertenencia total que se quiere obtener para la variable de salida z, μ_{Ci} es el perfil de pertenencia al conjunto de salida asociado a la regla i, C_i , y α_i es el valor de pertenencia determinado para la variable z al conjunto C_i .

$$\mu_{CSM}(z) = \max_i(\min\{\alpha_{zi}, \mu_{Ci}(z)\}) \quad \text{Ec. 6.2.3}$$

$$\mu_{CIM}(z) = \min_i(\max\{\alpha_{zi}, \mu_{Ci}(z)\}) \quad \text{Ec. 6.2.4}$$

$$\mu_{CSP}(z) = \max_i(\alpha_{zi} \cdot \mu_{Ci}(z)) \quad \text{Ec. 6.2.5}$$

En el sistema definido, se utiliza el método Sup-Min, y se obtiene el perfil de pertenencia total mostrado en la Figura 42. El perfil final es el que encierra el área sombreada de la figura. Para su obtención se han empleado como valores de pertenencia a los conjuntos P y LP los obtenidos mediante la Ec. 6.2.1.

El resultado de la aplicación de todo el sistema, sin embargo, no puede ser una forma geométrica, ni un conjunto de valores de pertenencia, sino que debe ser una magnitud final, un valor numérico para la variable de salida, que en el ejemplo propuesto es el incremento que se debe inducir al termostato. Para determinar el valor final a partir de la función de pertenencia conjunta, también existen varios criterios.

Figura 42: representación del proceso de desborrosificación para la variable de salida del ejemplo propuesto.

El criterio del Centro de Gravedad (CoG), calcula el valor final mediante el centro de gravedad del área que encierra la función de pertenencia conjunta; el método del Máximo determina que el valor final es el valor medio del conjunto de salida con mayor nivel de pertenencia y el criterio del Máximo Indexado calcula el centro de gravedad de la unión del área activada de los conjuntos para los que se obtiene un nivel de pertenencia mínimo [73].

El algoritmo borroso definido emplea el primero de los criterios expuestos, o criterio CoG. Usándolo con los datos del ejemplo expuesto se obtiene un valor final para el incremento del termostato de 4.787°C . En la Figura 42, se muestra la representación geométrica del lugar en el que se encontraría el centro de gravedad del área obtenida, y el valor final de la variable ΔT .

Como conclusiones del apartado, se deben destacar varias ventajas del uso de un sistema basado en la FL y, concretamente de la utilización de un algoritmo borroso. En primer lugar, la aplicación del ejemplo propuesto pone de manifiesto la facilidad de modificar la base de conocimiento del sistema, cuyo núcleo es el motor de inferencia, para compensar posibles desajustes en los resultados obtenidos. Por ejemplo, si se detectase que el sistema no funcionase de manera adecuada, por defecto, en situaciones de temperaturas tipo (HC,L), bastaría con variar la regla que determina el comportamiento en esos casos, incrementando el nivel de la acción a realizar.

Otra conclusión que se puede obtener del ejemplo es que los sistemas que emplean un algoritmo borroso son especialmente adecuados para obtener un valor final numérico en situaciones en que los valores de entrada se encuentran en rangos de difícil caracterización. En el ejemplo ambas variables de entrada estaban en una zona de valores medios y cercanos, que no inducen a una respuesta evidente del sistema, pero si se sigue la base de conocimiento incluida, se obtiene un resultado numérico basado en la inferencia.

6.2.2.3 Variantes

En este apartado se detallarán las posibles variantes del método simple de aplicación del Algoritmo Borroso. Es necesario para una correcta comprensión de la configuración final elegida para el método implementado y su justificación. En el apartado anterior, muchas de las variantes del método se han explicado de forma detallada, por lo que en esos casos únicamente se enumerarán para dejar claro el número de posibilidades para diseñar un algoritmo borroso.

Quizá la variación más evidente entre dos aplicaciones del Algoritmo Borroso sería la relacionada con los conjuntos borrosos de cada sistema. Dichos conjuntos pueden ser completamente diferentes debido a su geometría. En la literatura se encuentran conjuntos triangulares simétricos [77], asimétricos [78][74], trapezoidales [80][82] sigmoides [79] o gaussianos [76]. También varía en cada trabajo el número de conjuntos de cada universo de discurso, así como los valores que los definen (por ejemplo, un conjunto triangular se definiría mediante su valor central y sus valores extremos).

Otra variación importante es el enfoque seguido para la definición del motor de inferencia en cuanto al tipo de salidas que incluye. Existen dos posibilidades principales, el enfoque de Mamdani y el de Takagi-Sugeno (T-S). El primero se corresponde con la implementación más habitual del Algoritmo Borroso [74][76]-[78], y es el seguido en el ejemplo descrito en el apartado anterior. Consiste, sencillamente, en que la activación de las reglas del sistema implica la pertenencia a uno de los conjuntos borrosos de salida. Los consecuentes de dichas reglas serían, por tanto, del tipo “*z pertenece a C*”.

Según el enfoque T-S no se incluye la pertenencia a conjuntos borrosos como posibles salidas, sino que se asocia a cada regla funciones que calculan el valor de las variables de salida[54][74][81]. En el ejemplo del control del aire acondicionado del apartado anterior, el enfoque T-S se podría haber seguido definiendo el motor de inferencia mediante reglas como las siguientes:

- *Si la temperatura interior(T_i) es Fría (C) Y la temperatura exterior(T_o)es Extremadamente Baja (EL), ENTONCES el incremento del termostato(ΔT) será:*

$$\Delta T = 8 \cdot [1 - (T_i - T_o)/40] \quad \text{Ec. 6.2.6}$$

- *Si T_i es ELY T_o es EL, ENTONCES:*

$$\Delta T = +10^0 C \quad \text{Ec. 6.2.7}$$

Como es fácilmente deducible, el enfoque T-S no solamente influye en el proceso de determinación de las salidas, sino que determina el algoritmo aguas abajo, puesto que en esos casos no es necesario aplicar los procedimientos de composición ni de desborrosificación usuales. Para esa variante, se emplea una ponderación de las distintas funciones de salida según el grado de activación de cada regla.

La composición del perfil de la función de pertenencia de los valores de salida a sus conjuntos borrosos asociados se realiza siguiendo dos enfoques principalmente. El método Sup-Min consiste en definir la función de pertenencia saliente como el supremo del mínimo entre el valor de pertenencia a cada conjunto y su función de pertenencia. En la composición sup-producto se obtiene un perfil de pertenencia a cada conjunto de salida multiplicando su función de pertenencia por el grado de activación de la regla asociada.

El valor de salida desborrosificado se determinará mediante la unión de las áreas encerradas bajo los perfiles de pertenencia a los conjuntos de salida. El método más empleado y eficiente consiste en hallar el centro de gravedad de dicha área. Otras variantes consisten en obtener el centro del conjunto con mayor grado de pertenencia o tener en cuenta sólo el área sobre un valor de pertenencia umbral [73].

6.2.2.4 Justificación de la elección de la FL

Tras describir la Teoría de la Lógica Borrosa general, así como el método básico para su aplicación y las posibles variaciones, en este apartado se procederá a justificar por qué se ha elegido aplicarla para desarrollar la etapa de evaluación de la metodología. De esta forma, los argumentos para dicha elección se pueden apoyar en los conceptos explicados previamente.

Una razón de gran importancia para la elección de la FL para desarrollar el sistema de evaluación de soluciones ha sido su característica relativa a la modelización de conceptos lingüísticos. Gracias a ello, es posible la obtención de un sistema numérico basado en reglas capturadas a partir de valoraciones subjetivas, como por ejemplo que una solución tenga el calificativo de “BUENA”, “MALA” o similar en función de los calificativos de sus parámetros de evaluación, relativos a costes, tiempos y eficiencia.

Además, este mismo modo de definir las reglas que gobiernan el sistema, hace que sea muy sencillo modificarlo para ajustarlo y que su funcionamiento interno pueda ser comprendido con rapidez por un usuario con mínimos conocimientos sobre la FL.

Por otra parte, la FL cumple los requisitos establecidos en el diseño de la metodología. Primero, se permite la evaluación multicriterio, teniendo en cuenta varios parámetros de cada solución. Además, debido a los procesos internos del sistema, los resultados finales obtenidos muy probablemente no se repetirán para soluciones distintas, por lo que es posible comparar dos alternativas muy similares y obtener la mejor de ellas según el sistema.

6.2.3 Método final desarrollado

En este tercer apartado del capítulo se explicará detalladamente el sistema que se ha construido finalmente para la evaluación de las soluciones generadas en la metodología. Se describirán tanto los aspectos técnicos del método, los conjuntos borrosos definidos para las entradas y la salida o las reglas de composición y desborrosificación, como aspectos relativos al enfoque, como los criterios empleados en la evaluación y la manera en que se ha incluido la incertidumbre en el sistema.

6.2.3.1 Criterios e indicadores de evaluación

En la metodología que se propone se plantea la utilización de la FL para evaluar la calidad de las soluciones al problema conjunto obtenidas basándose en varios criterios. La elección de dichos criterios será, por tanto, un aspecto esencial del sistema evaluador. Dado que el diseño inicial del proceso de montaje se trata de un problema de Ingeniería de Fabricación, se ha optado por incluir los baremos tradicionales de la disciplina para valorar la viabilidad y calidad de una solución. Así, como criterios se han seleccionado el tiempo y el coste. A ello se ha añadido como tercer criterio la eficiencia en el uso de los recursos.

La eficiencia en el uso de los recursos se calcularía, como se detalla en la sección 5.5, mediante una suma ponderada de las eficiencias en el uso de todos los recursos. A su vez, la eficiencia de un recurso individual se define, según se propone, como la proporción del tiempo que el recurso es utilizado directamente y el tiempo que está asignado al proceso. Se considera un valor importante, dado que puede ser indicador de que una solución, independientemente de sus resultados en cuanto a costes y tiempo, no está aprovechando el potencial de los recursos asignados, por lo que es susceptible de ser mejorada. Los cálculos matemáticos de la eficiencia del uso de cada recurso individual y su valor total para la solución se realizarán como plantean las ecuaciones Ec. 5.5.26 y Ec. 5.5.28, respectivamente.

Para diseñar un sistema evaluador son imprescindibles unos criterios, en este caso el tiempo, los costes y la eficiencia, pero eso no es suficiente; además se requiere una manera de medirlos, unos indicadores. Los indicadores, según la metodología que se propone, son parámetros del sistema cuyo valor es representativo de los resultados de una alternativa determinada atendiendo al criterio correspondiente.

En el caso del coste, para evaluar el de una solución completa para el proceso de montaje de un producto, un indicador evidente sería el coste asociado al montaje de una unidad, sumando el coste de los procesos que requiere. Sin embargo, como se ha discutido en las secciones 2.6 y 5.5.1, existen otros parámetros candidatos más adecuados, dado que basarse en el coste de la fabricación de una unidad se considera seguir el enfoque de estimación de costes basado en el volumen. La metodología desarrollada se basa en el enfoque de costes basados en actividades, que representa una mayor trazabilidad [83]-[85], por lo que se considera más adecuado el empleo de indicadores basados en el coste por unidad de tiempo, diario, semanal o, como se ha seleccionado finalmente, del tiempo de un ciclo.

Es cierto que una valoración adecuada de una solución del proceso de montaje necesita una estimación de los costes que se asocian a la producción de una unidad (o incluso de la serie completa), pero si se suman los costes de todas las actividades ejecutadas durante un tiempo de ciclo, el resultado será equiparable al coste imputable al montaje de la unidad que sea finalizado en dicho ciclo. Este indicador es cualitativamente distinto al coste de los procesos de fabricación asociados a una unidad, pues se obtiene de las actividades que se realizan cíclicamente, aunque para el modelo PPR definido, al incluir únicamente actividades de nivel unidad, ambos pueden coincidir en su valor.

El indicador de los resultados en cuanto al tiempo también ha requerido una selección cuidadosa. Como candidatos se han valorado el tiempo que se requiere para el ensamblaje completo de una unidad, denominado tiempo de entrega en la literatura[22][25][26]; el tiempo de ciclo determinado por la solución, y la diferencia entre el tiempo de ciclo objetivo, Proporcionado como condición inicial, y el anterior. Dado que la incertidumbre se ha incluido en el modelo, se valoró emplear el último candidato, pero definiéndolo como el área encerrada por la distribución de probabilidad del tiempo de ciclo, para valores mayores que el tiempo de ciclo objetivo.

Finalmente se seleccionó el primer indicador descrito, dado que su valor es ya directamente proporcional al tiempo de ciclo, y además incluye en su cálculo la información relativa al número de ciclos que se requieren para ensamblar un producto completo, según la Ec. 5.5.17 de la sección 5.5.5. Este indicador se considera más adecuado que el tiempo de ciclo, dado que una solución no puede considerarse de calidad en cuanto al tiempo si tiene un tiempo de ciclo muy reducido pero el número de ciclos es mucho mayor que otras alternativas.

El indicador para el criterio de la eficacia es una elección más sencilla, dado que se ha creado la definición de dicho concepto en el contexto de la metodología que se propone. Por tanto, se considera que el indicador más adecuado es el mismo valor definido matemáticamente tal y como se especifica en la sección 5.5.

Como conclusión, se desea remarcar que los criterios seleccionados para la evaluación de las soluciones generadas son el tiempo, el coste y la eficacia; y para su valoración se emplearán como indicadores el tiempo para el ensamblaje de una unidad completa, el coste del proceso por ciclo y la definición matemática de la eficacia creada en la misma metodología que se plantea.

6.2.3.2 Salida del sistema

Las variables de salida del sistema representan un aspecto esencial, ya que serán los resultados que se busca obtener con la aplicación del mismo. En el algoritmo borroso desarrollado, se ha definido como única variable de salida la puntuación obtenida por la solución que se está valorando. El valor será un número real comprendido entre 0 y 10.

Como se verá en los próximos apartados, se ha definido 9 conjuntos borrosos para la variable de salida, lo que incrementa la variabilidad del resultado final obtenido, de forma que es muy poco probable que dos soluciones obtengan el mismo valor numérico. Este aspecto se ha tenido en cuenta al decidir emplear la FL para el desarrollo del sistema evaluador. Además, como se planteará más adelante, el hecho de que la salida sea una puntuación facilita la definición de las reglas del motor de inferencia, ya que bastará con calificar con el valor medio de uno de los conjuntos de salida a las hipotéticas soluciones representadas por las combinaciones que activan las distintas reglas.

6.2.3.3 Conjuntos borrosos de entrada y salida

La determinación de los criterios de evaluación y sus indicadores es únicamente el primer paso de la definición del proceso de entrada de información al sistema evaluador. Se requiere además un proceso de borrosificación de dicha información para obtener un conjunto de variables lingüísticas compatibles con las reglas del motor de inferencia. De la misma forma, la información obtenida al aplicar dichas reglas, debe someterse a un proceso inverso, para determinar unos valores numéricos para las variables de salida finales.

Los procesos de borrosificación y desborrosificación vienen dados, en gran medida, por los conjuntos borrosos definidos para cada universo de discurso. Las características de dichos conjuntos será, junto con el motor de inferencia, lo que defina un sistema evaluador basado en la FL. A continuación se caracterizará los conjuntos borrosos definidos para la metodología, mediante una descripción de su geometría y sus funciones de pertenencia.

La geometría de los conjuntos borrosos del sistema es de tipo triangular simétrico, excepto los conjuntos de los extremos inferior y superior de cada universo de discurso, cuyo valor de pertenencia para, respectivamente, valores menores y mayores es constante e igual a 1. Además, en cada universo de discurso todos los conjuntos triangulares tienen las mismas características de anchura, y están distribuidos de forma que el valor medio de cada uno coincide con los valores extremos de los conjuntos adyacentes, logrando así un solapamiento, que contribuye a enriquecer el proceso de borrosificación, pues potencia la faceta de inclusión de la ambigüedad en el modelo, lo que distingue los métodos basados en la FL de otros[73]. La *Figura 43* muestra la geometría de los conjuntos de entrada definidos para el sistema.

Para cada variable de entrada se ha definido un total de 5 conjuntos borrosos, denominados A, B, C, D y E, que representan una categorización de los posibles valores de cada indicador, según la cual A es la mejor categoría y E la peor. Para la eficiencia se emplea el mismo tipo de conjuntos, pero en el proceso de borrosificación se realiza un paso previo de cambio de variable, en el que la nueva variable adquiere el valor opuesto de la eficiencia. De esa forma se solventa el carácter creciente de la eficacia con la calidad de las soluciones, opuesto al del tiempo y los costes.

Para definir completamente un conjunto borroso, se requiere su función de pertenencia asociada, que relaciona cualquier valor dentro del universo de discurso de una variable con un valor de pertenencia entre 0 y 1. Los conjuntos de tipo triangular se modelan con funciones como la expresada por la Ec. 6.2.8, por lo que los parámetros que definen un conjunto de este tipo serán su extremo inferior, a , su valor central, b y su extremo superior, c .

$$\mu_C(x) = \begin{cases} (x - a)/(b - a), & x \in [a, b) \\ (c - x)/(c - b), & x \in [b, c) \\ 0, & \text{any other case} \end{cases} \quad \text{Ec. 6.2.8}$$

Sin embargo, dada la disposición definida para los conjuntos de entrada, mostrada en la *Figura 43*, se deduce que no se requiere un número tan alto de parámetros. En cada universo de las variables de entrada (coste, tiempo o eficiencia) se cumple que cada conjunto tiene un valor medio que coincide con los extremos de los conjuntos adyacentes, por lo que bastaría con definir los valores a, b, c, d y e de la *Figura 43*; pero además, para todas las variables de entrada se definen 5 conjuntos borrosos y cada uno es simétrico respecto a su eje medio. De todo ello, se deduce que únicamente es necesario especificar el valor del valor central de 2 de los conjuntos para definir el grupo entero.

Figura 43: geometría y disposición de los conjuntos borrosos de entrada.

Las ecuaciones Ec. 6.2.9 a Ec. 6.2.14 muestran la forma de determinar los parámetros para la definición de las funciones del grupo de conjuntos borrosos que divide el universo de cada una de las variables de entrada. En el caso del tiempo, se emplea como el valor central, e_t , del conjunto de peor calidad, E, al producto del tiempo de ciclo objetivo por un número inicial de ciclos o estaciones, BNS_0 , que se define como el número de uniones más el número de transportes (este parámetro se calcula en la Ec. 5.5.19).

El número inicial de ciclos se calcula asumiendo que cada unión se ejecuta en una estación de la línea. El tiempo de ciclo objetivo es un parámetro de entrada. El valor central, a_t , del conjunto A, de mayor calidad, se define como el 40% del valor anterior. El valor que se usa como indicador del tiempo será el producto del tiempo de ciclo de la solución por el número de ciclos real, o de estaciones máximo de entre las ramas de la cadena, denominado BNS. Este valor incluye los transportes y escalas, según la Ec. 5.5.18.

Para el coste, el valor central del conjunto E será el coste máximo asumible para el montaje, C_{MAX} . Dicho valor forma parte de las condiciones iniciales del problema. El valor medio del conjunto A se ha definido como el 30% del valor anterior (Ec. 6.2.11 y Ec. 6.2.12).

Para la eficiencia, se ha definido el valor medio del peor conjunto como 5, y el del mejor, A, como 95. Para poder ejecutar la borrosificación de la eficiencia se debe realizar previamente un cambio de variable, que ajuste el sentido de crecimiento de la variable de entrada con el orden de los conjuntos según la recta real.

Para caracterizar el valor de la variable de salida se ha definido un total de 9 conjuntos borrosos, Z_1 a Z_9 , tal y como muestra la *Figura 44*. Se puede observar que la distribución de los conjuntos es similar a la definida para los conjuntos de entrada, salvo en el número de conjuntos. Dado que se busca una puntuación final de cada solución, se ha optado por otorgar a los puntos centrales de los distintos conjuntos los valores de 1 a 9.

Figura 44: conjuntos borrosos de salida.

Los conjuntos Z_1 y Z_9 no son triangulares, sino que asocian una pertenencia constante e igual a 1 para valores de salida entre 0 y 1 y entre 9 y 10, respectivamente. Todo lo anterior hace que al aplicar el proceso de desborrosificación, el resultado final sea un número real entre 0 y 10, que se considerará la puntuación de la solución correspondiente.

El hecho de que la variable de salida sea una puntuación, y el uso de 9 conjuntos borrosos, representativo cada uno de un valor exacto del 1 al 9, serán muy útiles para la definición de las distintas reglas del motor de inferencia, como se detallará en el apartado 6.2.3.5.

6.2.3.4 Incertidumbre en el modelo

Para definir el sistema que evalúa las soluciones obtenidas siguiendo la metodología, ha sido necesario desarrollar una forma de ejecutar la borrosificación con datos numéricos con una incertidumbre asociada. Una característica importante de los modelos que se proponen es precisamente la inclusión de la incertidumbre en los cálculos, por lo que, a la hora de aplicar el algoritmo para la evaluación no se podía ignorar dicho valor.

En otras aplicaciones basadas en la FL de la bibliografía[74]-[79], la incertidumbre no se incluye de forma explícita en el sistema, sino que se supone que se tiene presente implícitamente, dado el papel de la FL de obtener resultados a partir de valores que pueden ser inciertos.

La implementación de algoritmo borroso desarrollada y que se propone como parte de la metodología sí que incluye explícitamente la incertidumbre asociada a cada valor de las variables de entrada. Ello afecta principalmente al proceso de borrosificación. La Figura 45 muestra los 5 conjuntos borrosos para una variable de entrada y un valor X_i de la misma, con una distribución normal de la misma, que vendrá determinada por un valor de varianza asociado a una incertidumbre.

Como se detalla en el apartado 5.5.3, se asume que todas las variables siguen una distribución normal, con una varianza coherente con la incertidumbre propagada en el modelo, que presenta un nivel de confianza del 95%.

Si se ignorara la incertidumbre asociada, y se tratase como un valor numérico preciso, se puede observar que X_i tendría unos valores de pertenencia a los conjuntos B y C de 0.2 y 0.8, respectivamente. Sin embargo, al seguir una distribución estadística, no se puede asegurar el valor de X_i , por lo que su pertenencia a los distintos conjuntos se debe calcular como la esperanza de pertenencia, teniendo en cuenta los distintos valores de la función densidad de probabilidad.

Figura 45: conjuntos borrosos y densidad de probabilidad de un parámetro de entrada.

Para calcular la pertenencia de una variable con un valor que sigue una distribución normal, se ha seguido el siguiente razonamiento. El valor de la variable no se conoce, pero para todo el dominio de su distribución normal, $g(x, X_i, V_i)$, cada diferencial, dx , tendrá una probabilidad igual al valor (x, X_i, V_i) por la anchura del diferencial de ser el valor de X_i (Ec. 6.2.16), siendo V_i la varianza de la distribución.

$$P[X_i = x] = g(x, V_i) \cdot dx \quad \text{Ec. 6.2.15}$$

Por tanto, el valor de pertenencia de un valor x , del dominio de (x, X_i, V_i) , a un conjunto borroso Z con una función de pertenencia $\mu_Z(x)$ vendrá dado por el valor de dicha función en x y por la probabilidad de que el valor de X_i sea x (Ec. 6.2.16). Por lo que, definiendo la pertenencia $\mu_Z(X_i)$ como la esperanza de dicha magnitud, la forma de calcular dicho valor sería integrar la Ec. 6.2.16 en todo el universo de discurso de la variable, DU_i (Ec. 6.2.17).

$$\mu_Z(x) = \mu_Z(x) \cdot g(x, V_i) \cdot dx \quad \text{Ec. 6.2.16}$$

$$\mu_Z(X_i) = \int_{DU_i} \mu_Z(x) \cdot g(x, V_i) dx \quad \text{Ec. 6.2.17}$$

Si se sustituye en la Ec. 6.2.17 las fórmulas analíticas de las funciones de pertenencia a un conjunto borroso triangular, $\mu_Z(x)$, según la Ec. 6.2.8, y la densidad de probabilidad de una distribución normal de esperanza E_i y varianza σ_i , se obtiene la Ec. 6.2.18. El intervalo de integración se ha reducido al intervalo real $[a, c]$, dado que para el resto de valores del universo de discurso, la función de pertenencia al conjunto genérico Z es igual a 0.

$$\mu_Z(X_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \left(\int_a^b \frac{x-a}{b-a} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-E_i}{\sigma_i} \right)^2} dx + \int_b^c \frac{c-x}{c-b} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-E_i}{\sigma_i} \right)^2} dx \right) \quad \text{Ec. 6.2.18}$$

La integral se puede resolver mediante un cambio de variable hasta descomponerla en integrales simples y otras como el primer término de la Ec. 6.2.20. Estas últimas son equivalentes a la probabilidad de superar un valor de una distribución normal. Dichos cálculos están tabulados, y esa información se emplea para hallar la solución. Tras resolver las integrales sencillas y sustituir la Ec. 6.2.20, se halla la función final que determina la pertenencia al conjunto Z de una variable X_i de esperanza E_i y varianza σ_i , según la Ec. 6.2.19. La demostración matemática completa se encuentra en el apartado 13.3.1 de los Anexos.

$$\mu_Z(X_i) = \frac{\sigma_i}{\sqrt{2\pi}(b-a)} \left[e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{c-E_i}{\sigma_i}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{a-E_i}{\sigma_i}\right)^2} - 2e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{b-E_i}{\sigma_i}\right)^2} \right] +$$

$$+ \frac{E_i - a}{b - a} (P[N(E_i, \sigma_i) \leq b] - P[N(E_i, \sigma_i) \leq a]) +$$

$$+ \frac{c - E_i}{c - b} (P[N(E_i, \sigma_i) \leq c] - P[N(E_i, \sigma_i) \leq b])$$

Ec. 6.2.19

$$\int_a^b \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-E_i}{\sigma_i}\right)^2} dx = P[N(E_i, \sigma_i) \leq b] - P[N(E_i, \sigma_i) \leq a]$$

Ec. 6.2.20

Por lo tanto, según el razonamiento descrito, la variable X_i mostrada en la Figura 45 tendría un grado de pertenencia no nulo para los conjuntos A, B, C y D; si bien para el primero de ellos la pertenencia sería muy baja, cercana al 0. La pertenencia al conjunto C bajaría del valor de 0.8, obtenido siguiendo el enfoque tradicional, mientras que la de B subiría del 0.2 anterior.

6.2.3.5 Reglas del motor de inferencia

Tras obtener el grado de pertenencia a los conjuntos borrosos de entrada, se determina para dicha información una salida, en base a un conjunto de reglas codificadas en el núcleo del sistema, denominado motor de inferencia.

El motor de inferencia es la parte de un desarrollo basado en FL en la que se almacena gran parte del conocimiento que rige el comportamiento de todo el sistema [73]. En la implementación que se propone, se trata de un conjunto de reglas basadas en proposiciones booleanas acerca de pertenencia a conjuntos borrosos. La Tabla 25 muestra un extracto de las reglas definidas para el sistema.

Dado que se ha definido 9 conjuntos borrosos, en orden creciente con la calidad de la solución, la definición de cada regla se puede interpretar como puntuar la calidad de una solución (de 1 a 9) atendiendo a la calidad de cada una de sus partes específicas. Por ejemplo, si una solución tiene una calificación de A, A, B para su tiempo, coste y eficiencia, respectivamente, su puntuación de salida será un 7. En cambio, si tiene pertenencia a los conjuntos B, A, A la puntuación es mayor, dado que el tiempo deja de ser tan determinante para soluciones de alta calidad, pues se estima que con cumplir el tiempo de ciclo se considera la solución aceptable.

Se ha seguido, por tanto, el enfoque Mamdani. Según esa aproximación, la información de salida será un conjunto de valores de pertenencia a conjuntos borrosos. Se ha escogido dicho enfoque frente al de Takagi-Sugeno (T-S), que consiste en asociar cada regla una función que calcule el valor de salida. El valor numérico final será una composición ponderada, según el grado de activación, de los valores obtenidos mediante las funciones asociadas a las reglas activadas. Habría sido factible implementar el enfoque T-S, pero se estima que guarda menos correspondencia con la idea de categorizar cada solución según una serie de conjuntos borrosos y obtener de ello un valor numérico final.

A	A	A	9	B	A	A	9	C	A	A	7	D	A	A	3	E	A	A	1
A	A	B	8	B	A	B	8	C	A	B	6	D	A	B	2	E	A	B	1
A	A	C	7	B	A	C	7	C	A	C	5	D	A	C	2	E	A	C	1
...				...				...				...				...			
A	B	C	7	B	B	C	6	C	B	C	5	D	B	C	2	E	B	C	1
A	C	D	5	B	C	D	5	C	C	D	4	D	C	D	1	E	B	B	1
...				...				...				...				...			
A	E	C	2	B	E	C	2	C	E	C	2	D	E	C	1	E	E	C	1
A	E	D	1	B	E	D	2	C	E	D	1	D	E	D	1	E	E	D	1
A	E	E	1	B	E	E	1	C	E	E	1	D	E	E	1	E	E	E	1

Tabla 25: reglas del motor de inferencia

El grado de activación de cada regla se determina mediante la t-norma del mínimo o de Mamdani, es decir, se emplea el valor mínimo de pertenencia de las tres variables a los conjuntos borrosos asociados con la regla.

Dado que el sistema admite 3 variables distintas, que pueden pertenecer a 5 conjuntos de entrada, el motor de inferencia consta de 125 (es decir, 5^3) reglas. Se considera que cualquier combinación de valores de entrada es posible, por lo que se ha optado por no eliminar ninguna regla ni definir únicamente parte de las posibilidades. En la Tabla 25 se muestra un extracto, en el apartado 0 de los anexos se detalla el conjunto total de reglas.

Cada regla relaciona una información borrosa de entrada, la pertenencia a una combinación de conjuntos borrosos, a una salida borrosa como es la pertenencia a un conjunto de salida borroso. Por ello la información de salida se debe procesar aplicando una desborrosificación, que obtenga como resultado un valor numérico final.

6.2.3.6 Composición del perfil final y desborrosificación

Una vez se determina qué reglas se han activado por las entradas y el grado de activación, se debe ejecutar una desborrosificación, en la que se emplee la información borrosa de salida del motor de inferencia para obtener un resultado final.

Al seguir el enfoque de Mamdani, se debe utilizar la pertenencia a cada conjunto de salida para construir una función de pertenencia total, de la que se pueda obtener el resultado de la evaluación. Como norma de composición, se ha seleccionado Sup-Min. Según dicha norma, el perfil de pertenencia lo determina, para cada conjunto, el supremo del mínimo entre la función de pertenencia correspondiente y una función constante de valor el grado de pertenencia a dicho conjunto.

Tras realizar la composición, se debe ejecutar la desborrosificación propiamente dicha. Partiendo del área encerrada por el perfil calculado anteriormente, se calcula el valor que más represente al conjunto. La Figura 42 muestra el perfil final de pertenencia y el área que encerraba.

Como regla de construcción, se ha seleccionado el de Centro de Gravedad CoG para el sistema. Se ha elegido dicho criterio porque se estima que es el que tiene más en cuenta la pertenencia simultánea a varios conjuntos borrosos. Consiste en determinar el centro de gravedad de la superficie encerrada por el perfil de pertenencia a los conjuntos de salida, y utilizar las coordenadas obtenidas dentro de la recta real como valor final.

La Ec. 6.2.21 muestra la manera de calcular el valor final de la puntuación de salida. μ_j es la función de pertenencia conjunta a los distintos conjuntos borrosos de salida (representativos de puntuaciones del 1 al 9), y DU_o es el universo de discurso de la variable de salida, la puntuación (el intervalo real entre 0 y 10).

$$Score = \frac{\int_{DU_o} x^2 \cdot \mu_j(x) \cdot dx}{\int_{DU_o} \mu_j(x) \cdot dx} \quad \text{Ec. 6.2.21}$$

Con este último apartado se considera detallado el algoritmo borroso desarrollado para la fase de evaluación de la metodología, tras haber explicado y justificado sus mecanismos internos y los principios en los que se apoya. Previamente se había detallado de la misma forma el método meta heurístico definido para la optimización de la red logística. Con todo ello, se considera concluido el Capítulo 6, dedicado a los métodos específicos incluidos en la metodología. En el 0 se describirá la ejecución de la metodología propuesta. Ello incluirá la aplicación de los métodos especificados en este capítulo.

Capítulo 7

Metodología Propuesta

El capítulo recoge todos los pasos que componen la metodología que se propone, así como la forma de ejecutarlos, la secuencia que se debe seguir y entradas y resultados esperados de cada uno. El objetivo principal de la metodología es la obtención de soluciones factibles para el diseño del proceso de montaje a nivel conceptual, y determinación de la más adecuada de ellas.

Si bien el capítulo trata de la metodología teórica desarrollada, para la explicación de muchos aspectos de la misma se muestra diversas partes de la aplicación desarrollada como primer prototipo de la implementación. Concretamente, se expondrán interfaces para asistir en las distintas etapas de la metodología, que han sido definidas y desarrolladas durante la programación de dicha aplicación. Los diagramas de flujo de procesos concretos dentro de la metodología también se desarrollaron, en muchos casos, de forma conjunta con la aplicación.

Se ha desarrollado un procedimiento para la aplicación de la metodología, mediante la ejecución de 6 bloques diferenciados que abordan distintas partes del problema. Dicho procedimiento se ha definido partiendo del flujo de trabajo modelado por Más para el diseño del proceso de montaje. La Figura 46 muestra dicho flujo de trabajo según la convención IDEF0. Según se puede observar, se parte de una estructura de tipo As Planned, y las etapas consisten en la generación de los procesos de la línea, de los recursos necesarios, de los tiempos del proceso y la definición final.

Figura 46: diagrama IDEF 0 del flujo de trabajo para el diseño conceptual del proceso de montaje propuesto por Más [1].

El procedimiento parte de esta idea, aunque plantea un orden distinto para las etapas. Según dicho orden, la distribución de las actividades en estaciones, que está incluido en la definición de la línea, se debe ejecutar con anterioridad a la generación de los recursos concretos requeridos. Se ha determinado esta secuenciación porque de esa forma es posible realizar una evaluación más adecuada de las implicaciones de asignar un determinado recurso u otro, dado que la estructura de procesos de la línea ya se encuentra definida.

El capítulo incluye un primer apartado con una descripción del procedimiento completo para la aplicación de la metodología, con sus distintos bloques y los estados por los que pasa una solución durante su definición. Además, se describe la interfaz general desarrollada para gestionar todo el procedimiento, lanzando sus distintos bloques según el estado de la solución. Se incluye también la descripción de la forma adoptada para representar las soluciones definidas, mediante documentos de tipo CATProcess del entorno CATIA.

El resto de apartados se dedican a la descripción de los distintos bloques que componen el procedimiento. Para cada uno, el capítulo incluye un apartado en el que se detallan sus entradas y requisitos para su ejecución, las funcionalidades de diseño que incluye y la manera en que se desarrolló su codificación, para aquellas cuya programación implicase una implementación de cierta complejidad. En esos casos, en el apartado correspondiente se describirá los objetos empleados y los diagramas de flujo diseñados. Para cada bloque también se detalla la interfaz que se diseñó para facilitar la ejecución de las distintas funcionalidades de ese paso.

El apartado relativo al Bloque B incluye, a su vez, la descripción detallada de las 4 etapas en las que se ha dividido el bloque, de forma que para cada una de ellas se describe las entradas, requisitos y salidas, funcionalidades, implementación y las interfaces diseñadas, como si se tratara de un bloque.

7.1 Procedimiento

La metodología que se propone se aplica siguiendo un procedimiento desarrollado para completar de forma gradual el diseño conceptual del proceso de montaje. Este procedimiento está compuesto por un conjunto de bloques, dedicados a las facetas que se han considerado para el problema que se desea resolver, enunciado en el apartado 1.7, cuya interpretación se describe en el apartado 3.2 y se modeliza según lo explicado en el apartado 5.1.

Como se comenta en dichas secciones, las principales facetas son la definición de la línea de montaje, en cuanto a sus estaciones, operaciones, productos intermedios y recursos asignados; la definición de una red logística, basada en la selección de la ubicación de las plantas de producción y de los medios de transporte que las comuniquen y el diseño de la distribución en planta de cada parte de la línea de montaje, o posicionamiento de los recursos y productos de las estaciones de la misma dentro del espacio físico de las plantas asociadas. Además todo ello viene condicionado con la distribución del montaje, que queda definido mediante la vista del producto As Planned (el producto se estructura agrupando los componentes en los sub montajes que se ensamblarán en los distintos nodos industriales). La creación de dicha vista representa otra de las facetas del problema.

Metodología Propuesta

Figura 47: flujo de trabajo definido en la metodología.

Los distintos bloques que componen el procedimiento están orientados a la definición de las partes de la solución correspondientes a las facetas del problema comentadas, además de un último bloque dedicado a la evaluación global de una solución completa del problema y un bloque inicial cuyo propósito es la carga, definición y lectura de la información relativa a las condiciones iniciales del problema. Concretamente, se ha definido el Bloque 0, para la asociación de las condiciones iniciales; el Bloque A, para la creación de la estructura de la vista As Planned; el Bloque B, el Bloque C y el Bloque D, para la definición de la línea de montaje, de su distribución en planta y de la red logística, respectivamente y el Bloque E para la evaluación final de una solución factible generada. La Figura 47 muestra el flujo de trabajo correspondiente a las acciones incluidas en la metodología, con las salidas, entradas, información que la limita y medios para asistir cada tarea, según la nomenclatura de IDEF0.

Los distintos bloques se han ideado teniendo en cuenta unos objetivos específicos, lo cual determina un conjunto de funcionalidades a incluir en cada bloque. De entre ellas, muchas requieren la intervención de un usuario, con alguno de los roles relacionados con el diseño del proceso de montaje. En consecuencia, es necesaria la definición de las distintas acciones que el usuario puede ejecutar para aplicar la metodología. Todo ello ha conducido al diseño de unas interfaces que permiten la interacción con el sistema. Se ha diseñado una interfaz para cada bloque, y otras para partes concretas de alguno de ellos.

La Figura 48 representa un mapa de todas las interfaces definidas para la aplicación de la metodología. Como se puede observar, hay una interfaz maestra, que ocupa la zona central superior, y sus distintos comandos activan la carga de las interfaces correspondientes a los distintos bloques del procedimiento. Dichos botones se han dispuesto dentro de la interfaz general según el diagrama de flujo que sigue el procedimiento desarrollado: tras asociar la información inicial, se define la vista As Planned, lo que precede a la definición de la red logística o de la línea de montaje, que precede a su vez a la definición de la distribución en planta o Lay Out (Bloques B, C y D); cuando se ha ejecutado los últimos tres pasos, se puede repetir el ciclo de manera iterativa o lanzar la evaluación de la solución creada.

En la Figura 48 se aprecia, además, que para iniciar los bloques B y C, se requiere lanzar una interfaz previa. Su función es la selección de un nodo industrial para la definición de su línea de montaje asociada o de su distribución espacial, según si se trata del Bloque B o el C. Dicha selección se puede realizar mediante el nombre del nodo, o bien de manera interactiva sobre el documento que representa la solución general. A su vez, la interfaz para el Bloque B se compone de 4 comandos, para las etapas en las que se ha descompuesto dicho bloque. A continuación, se describirán con más detalle los bloques definidos.

Figura 48: mapa de las interfaces desarrolladas para seguir el procedimiento.

7.1.1 Bloques

El procedimiento está repartido en 6 partes, los Bloques 0, A, B, C, D y E. La metodología no establece que se deban ejecutar secuencialmente en dicho orden, sino siguiendo un flujo que permite la repetición de algunos bloques para la mejora de una solución. La Figura 22 representa dicho flujo, y se ha incluido dicha imagen en la misma interfaz general, mostrada en la Figura 48, en la zona central.

Cada uno de los bloques está ideado para cubrir una parte específica y diferenciada de la generación de una solución para el diseño conceptual del proceso de montaje. El Bloque 0 está orientado a la información sobre las condiciones iniciales del problema. Es imprescindible enlazar una representación del producto. La estructura en dicha representación no es relevante dentro de la metodología, pero se ha denominado vista As Designed porque presumiblemente proviene de la etapa de diseño del producto.

También se debe vincular un diccionario PRD que contenga una definición de todos los tipos de actividades y recursos contemplados para el proceso de montaje. Además, debe asociarse información relativa a la logística: plantas y medios disponibles, así como datos de ellos (distancias entre localizaciones y características de los medios disponibles). Por último, el sistema debe poder acceder las uniones definidas para el modelo de producto concreto. Para los tres primeros aspectos, únicamente se permite la carga de los archivos con esa información, en el formato adecuado. Para el conjunto de uniones, se puede cargar su representación mediante el archivo CATProcess correspondiente o bien generarla a partir del modelo de producto, creando una a una las distintas uniones, especificando tipo, componentes que vincula y el número de elementos de cada una. Para esta generación se ha definido una interfaz, que se muestra en la zona superior izquierda de la Figura 48. Se permite modificar la representación del conjunto de uniones, también mediante dicha interfaz.

El Bloque A tiene como objetivo la creación de la estructura de la vista As Planned. Para ello se ha desarrollado una interfaz que permite separar los componentes de un producto dado en sub montajes que a su vez también se pueden dividir en otros sub montajes hijos. Cada sub montaje definido representa un producto intermedio que se ensamblará en una línea de montaje diferente.

El Bloque B se debe ejecutar para cada nodo industrial por separado, por lo que es imprescindible que previamente se haya ejecutado el Bloque A, para definir la estructura de la vista As Planned. El bloque consiste en la definición de la línea de montaje asociada a cada nodo, por lo que primero se debe seleccionar uno. La definición de la línea se ha dividido en 3 partes: la definición de una secuencia de montaje, mediante la ordenación de las uniones incluidas en el producto intermedio; la definición de las estaciones de la línea entre las que se distribuyen las operaciones requeridas para ensamblar el producto intermedio y la asignación de los recursos específicos para dichas operaciones. Además, el bloque también incluye la evaluación local del nodo industrial cuya línea se está definiendo, en cuanto a tiempos, costes y eficiencia de la asignación de recursos.

El Bloque C cubre el diseño de la distribución en planta de las distintas líneas de montaje entre las que se reparte el proceso completo. También se ejecuta por separado para cada nodo, por lo que primero se debe seleccionar uno. Además, para poder ejecutar este bloque es necesario haber definido de forma completa la línea de montaje, puesto que debe haber unos recursos concretos que posicionar.

El Bloque D posibilita la definición de la red logística para el transporte de los productos intermedios entre las plantas industriales adecuadas. Esto se ejecuta de forma automática, mediante la aplicación de un método matemático meta heurístico de optimización discreta, denominado Optimización por Colonia de Hormigas (ACO). Antes de lanzar dicho método, se

permite fijar de forma interactiva parte de la solución a esta faceta del problema, definiendo la localización de algunos o todos los nodos de la red (no se trata sólo de los nodos industriales, también se incluye los puntos de partidas de los componentes individuales del producto). Esta interacción se asiste mediante la interfaz asociada según la Figura 48. Dado que se trata de las comunicaciones entre unos nodos que incluyen al conjunto de nodos industriales, también es necesario que se haya ejecutado previamente el Bloque A.

El Bloque E permite la evaluación global de una solución definida para el diseño conceptual del proceso de montaje. Para ello se ha desarrollado un sistema basado en la Lógica Borrosa, en el cual se introduce el valor de parámetros relativos a tiempos, costes y eficiencia de los recursos de la solución que se desea evaluar.

7.1.2 Estados de una solución

La metodología que se ha desarrollado tiene el objetivo de generar soluciones factibles de nivel conceptual para el proceso de montaje, y finalmente elegir la que se evalúe como más adecuada. En el proceso de generación de cada solución se ejecutarán los bloques descritos en el apartado 7.1.1, lo cual da lugar a un conjunto de estados que dicha solución debe atravesar para considerarse completa.

Se ha definido un total de 4 estados de desarrollo de una solución dada. Durante cada uno de estos estados, se plantea la ejecución de uno o varios de los bloques. A su vez, la definición de la línea de montaje, o Bloque B, se desarrolla en 4 pasos bien diferenciados o fases que se podrían considerar también estados. A continuación, se explicará cada posible estado de una solución generada siguiendo la metodología.

7.1.2.1 Estado Inicial (*Initial*)

Es el estado en el que se encuentra una solución desde el momento de su creación hasta que se ha asociado toda la información correspondiente a las condiciones iniciales. Esto incluye el diccionario PRD, la información logística, el modelo del producto en su vista As Designed, así como sus uniones. La identificación de este estado es ***Initial***.

Se debe precisar, que una determinada solución, en cualquiera de sus estados se puede almacenar como una variante y continuar su desarrollo como dos alternativas. Es decir, a partir de un punto dado, se puede efectuar un guardado de la solución para generar variaciones de la misma a partir de él.

7.1.2.2 Creación de la vista As Planned (*AS_PLANNED*)

La estructura de la vista As Planned del modelo del producto tiene gran influencia sobre el proceso de montaje entero, dado que sus nodos o sub montajes intermedios están directamente relacionados con los nodos industriales que existirán en el proceso, puesto que éstos incluyen el proceso de ensamblaje de aquéllos. La identificación de este estado es ***AS_PLANNED***.

En este estado se incluye todas las acciones relativas a la determinación de la vista As Planned para la solución que se está generando. Como acciones se incluye la creación, la carga o la modificación de la estructura de producto según la vista As Planned. Una vez esta estructura quede determinada y se abandone este estado, no se recomienda volver a él para redefinirla. Esto se debe a que un cambio en dicha vista puede suponer una modificación significativa de la solución, lo que conduciría a la creación de una alternativa distinta.

El trabajo realizado durante los sucesivos estados puede quedar invalidado si se modifica la vista As Planned, por ejemplo si se elimina o se cambia la configuración de un sub montaje del producto (si hay nuevos componentes, cambiará las uniones implicadas y se deberá redefinir la

secuencia de montaje y todos los pasos posteriores). La opción recomendada consiste en realizar un guardado de la solución en el punto de la definición de la vista As Planned para generar variantes a partir de él. Si para una determinada variante se mantiene alguno de los nodos de la solución original, es posible asociar la misma línea de montaje que se definió para la primera, de forma que no se duplique trabajo.

7.1.2.3 Definición de la Línea de Montaje y de la Logística (AS_PREPARED)

Tras la definición de la estructura de la vista As Planned, cada solución pasa a un estado en el que se incluye la ejecución de los bloques B y D. Éstos se corresponden con la definición de la línea de montaje y de la red logística, respectivamente. La identificación de este estado es **AS_PREPARED**.

Según el diagrama de flujo definido, no se debe volver directamente al Bloque D (definición de la logística) una vez se ha completado el B (definición de la línea). Esta consideración es meramente conceptual, y se debe a que si se ha definido la línea de montaje de un nodo industrial, es más lógico definir primero su distribución en planta o Bloque C antes de su red logística, dado que la primera permitirá determinar la superficie requerida por el nodo con cierta precisión, lo cual es una información importante para la ejecución de la segunda.

En la práctica, es decir, según cómo se ha diseñado la interfaz general del sistema, se permite la ejecución del Bloque B y del D en el orden que se desee, si bien es cierto que al finalizar el Bloque B se libera el acceso al C, que pertenece al siguiente estado.

7.1.2.4 Distribución en planta y evaluación (Resources_Loaded)

El cuarto estado, identificado como **Resources_Loaded**, comprende a las soluciones para las que al menos un uno de sus nodos tiene asociada una línea de montaje que se ha definido totalmente, mediante la ejecución completa del Bloque B. También se debe mencionar que dicho bloque permite desarrollar la línea de cada nodo siguiendo 4 fases consecutivas, o sub estados. Una solución probablemente poseerá varios nodos industriales que podrán tener sus líneas de montaje en fases de desarrollo diferentes. La solución se encuentra en este estado cuando la línea de al menos uno de los nodos se halle totalmente definida.

Aunque una solución se halle en este cuarto y último estado, se permite la ejecución de bloques que eran accesibles desde el estado anterior, concretamente los bloques B y D. De hecho, las soluciones que se encuentren en este estado deben seguir desarrollándose, mediante la ejecución de los bloques B, C y D, hasta que se considere que han cubierto todo su margen de mejora.

En cualquier momento, una solución en este estado se puede evaluar mediante la ejecución del Bloque E, si bien dicha evaluación arrojará resultados más precisos cuanto más cercana se halle la solución a su configuración definitiva.

7.1.3 Interfaz principal

La metodología se aplica mediante la ejecución de diversos bloques orientados a las facetas en que se puede descomponer el problema. Para gestionar la ejecución de cada bloque se ha desarrollado una interfaz general que permite lanzarlos. Se trata de la interfaz mostrada en la zona central superior de la Figura 48 y en la Figura 49 y la Figura 50. Se ha incluido en la misma una imagen con el diagrama general que sigue la metodología, y los distintos botones se han posicionado en el formulario según ello. Así, queda más claro el orden adecuado en que se deben aplicar los distintos bloques.

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

Figura 49: estados de la interfaz general.

Sin embargo, el orden de ejecución de los bloques no viene impuesto por el diagrama de la imagen, sino por un conjunto de estados que se han definido para el desarrollo de cualquier solución. Dichos estados se detallan en el apartado anterior, el 7.1.2. La interfaz principal se ha desarrollado de forma que únicamente muestra como disponibles los botones que lanzan los bloques asociados al estado en que se halle la solución que se está definiendo. La Figura 49 muestra el aspecto de la interfaz principal durante los 4 estados comentados, de izquierda a derecha y de arriba abajo.

El paso de un estado a otro se activa cuando se finaliza la última acción del paso final del estado anterior. Por ejemplo, una vez se ha definido la vista As Planned, el sistema genera de forma automática un producto con esa estructura y lo carga en el árbol PPR del documento que representa la solución. Dicho procedimiento interno automático incluye que el estado cambie del segundo al tercero.

La Figura 50 muestra la interfaz principal del proceso con los distintos comandos que incluye. Como se puede observar, y tal y como se ha descrito, los botones se han dispuesto según el orden del estado al que pertenecen y de forma coherente con el diagrama de flujo que se incluye como fondo del formulario.

Initial State area

Esta zona incluye los botones que activan las distintas acciones incluidas dentro del primer estado.

Load AS DESIGNED

Activa el comando del sistema para la selección de un archivo de tipo "CATProduct" y, si la selección es válida, lo abre y asigna el producto al árbol PPR del documento que representa la solución.

Load Initial conditions

Permite cargar los documentos de Excel que contienen la información del PRD y la información logística.

Create Joints

Lanza la interfaz que permite la definición de las uniones de un producto y la generación del documento que las representa.

Load Joints

Permite seleccionar un documento de representación de las uniones de un producto existente.

Modify Joints

Permite modificar el conjunto de uniones del producto.

Load iDMU

Permite cargar la representación de la planta de un nodo.

Define Transport

Lanza el Bloque D, para la definición de la logística.

Define Industrial Nodes

Lanza el Bloque B, para la definición de la línea de montaje del nodo industrial que se seleccione.

Design Lay Out

Lanza el Bloque C, para la definición de la distribución en planta de un nodo industrial.

As Planned view definition State area

Esta zona incluye los botones que permiten crear o asociar la vista As Planned del modelo de producto.

Reload

Relee la estructura del producto asociado como "As Planned", y actualiza la configuración de nodos industriales según ello.

Create AS PLANNED

Lanza la interfaz que permite la creación de la estructura As Planned y su documento CATProduct asociado.

Load AS PLANNED

Permite cargar un archivo CATProduct que represente una vista As Planned existente.

Modify AS PLANNED

Permite modificar la estructura de la vista As Planned.

Evaluate

Lanza el Bloque E, para la evaluación de la solución.

Load alternatives to compare

Permite cargar otras alternativas y comparar sus evaluaciones.

SAVE/SAVE AS ALTERNATIVE/OPEN ALTERNATIVE

Permite guardar el documento de la solución actual, guardarlo con otro nombre para generar variantes o abrir otras variantes.

Hide

Oculta la interfaz manteniendo la información generada.

Exit

Cierra la interfaz. La información generada se pierde.

Figura 50: comandos de la interfaz general.

7.1.4 Representación general

Un aspecto que se debe resaltar si se habla de la gestión global de una solución (ejecución de los bloques, guardado o carga de la misma) es la manera que se ha ideado para representarla dentro del entorno CATIA V5. Si bien la representación de productos, recursos, instalaciones o incluso procesos es un aspecto ya solventado en propio entorno, se ha tenido que idear la representación de una solución conceptual, que sólo existe como idea.

Se ha definido que una solución de diseño conceptual del proceso de montaje se represente mediante un documento de tipo proceso, es decir con formato "CATProcess" en CATIA V5. Este tipo de documentos tienen su contenido organizado en una estructura denominada árbol PPR (por Products, Processes and Resources). Así, la estructura de procesos se encuentra en la primera sección del árbol, los productos relacionados con ellos se encuentran en la siguiente y los recursos en la tercera y última. Sin embargo, productos y recursos asignados a una actividad de la zona de procesos aparecerán también bajo dicha actividad. El documento que represente una solución tendrá una serie de particularidades.

Figura 51: documento general de representación de una solución conceptual del proceso de montaje.

La Figura 51 muestra un ejemplo de representación de una solución, para el producto empleado en la ejecución de uno de los casos de estudio incluidos más adelante. En la zona izquierda se puede observar el árbol PPR, con las 3 secciones descritas, si bien la última de ellas, destinada a los recursos, se halla vacía.

En la sección de productos, en la parte inferior derecha, se puede observar que se incluye uno denominado AS PLANNED y otro AS DESIGNED. Se trata de productos con los componentes del que se desea ensamblar, estructurados según las vistas homónimas. Cuando se crea o se carga el producto que representa la vista As Planned, el correspondiente a la vista As Designed se oculta (tono más apagado en el árbol PPR). En la zona central derecha de la Figura 51 se muestra el producto con estructura As Planned desplegado.

En la zona de procesos del árbol, se incluirá una actividad por cada nodo industrial definido en la solución. En el ejemplo de la Figura 51, se ha definido una vista As Planned con 3 sub montajes, además del producto de nivel superior, por lo que habrá 4 nodos industriales, representados por 4 actividades en el árbol PPR del documento. Cada actividad tendrá asociado como producto el sub montaje correspondiente, y tendrá un nombre coherente con ello por defecto (por ejemplo, el nodo industrial correspondiente al ala izquierda se ha denominado “Assembly of LeftWing”).

Cada actividad representativa de un nodo industrial tendrá un conjunto de atributos que representen las distintas propiedades del nodo, principalmente su tiempo de ciclo, tiempo de transporte, coste de operación y coste de transporte, eficiencia del uso de recursos, así como las incertidumbres asociadas a todo ello.

La representación digital de la planta de cada nodo industrial, con los productos y recursos de la línea se encontrará en un documento CATProcess distinto, vinculado al documento general mediante un atributo, en la actividad correspondiente, con su dirección en el sistema de archivos, como aparece en la zona superior derecha de la Figura 51 (el atributo destacado en azul). Así se puede acceder a la representación de cada nodo industrial de la solución.

7.2 Bloque 0: carga de condiciones iniciales

El primer bloque del procedimiento no tiene asociado ningún desarrollo conceptual de la metodología, su cometido es la asociación de la información de partida requerida para la resolución del problema al que se enfoca la metodología. Dicha información, como se describe en el apartado, consiste en el diccionario PRD con todos los tipos de actividades y recursos; los datos relativos a la logística, distancias entre localizaciones y características de las plantas y de los medios de transporte; el conjunto de uniones definido para el montaje del producto y el mismo modelo del producto.

El Bloque 0 no tiene una interfaz visible definida, sino que las distintas acciones que incluye se lanzan desde la interfaz general del procedimiento. Dichas acciones consisten en la carga de los archivos, con los formatos definidos en la primera implementación desarrollada, que contienen la información que constituye las condiciones iniciales del problema. Para la carga de estos documentos se emplean los cuadros de diálogo del sistema operativo para seleccionar archivos.

7.2.1 Entradas

El bloque tiene como entradas los distintos elementos que contienen la información inicial para la definición de soluciones. Dicha información consiste en el modelo del producto, sus uniones, el diccionario PRD y la información logística.

En primer lugar, se debe asociar el producto cuyo montaje se desea definir. La estructura en que se reparten los componentes no tiene relevancia para la metodología, aunque se ha denominado *As Designed* porque conceptualmente se considera que proviene de la etapa de diseño del producto. Únicamente es necesario que dicha estructura contenga todos los componentes que se desean tener en cuenta en el ensamblaje del producto.

Otra entrada importante es lo que se ha denominado Condiciones Iniciales, que consiste sencillamente en la unión de la información relativa al diccionario PRD y la información logística. Si bien se trata de conceptos distintos, en la primera implementación de la metodología, de la que proviene el diseño de las interfaces que se muestran en este capítulo, se ha considerado que está contenida en el mismo archivo que la parte del PRD que contiene los tipos de actividades. Se trata de un archivo de Microsoft Excel que contiene varias páginas: en una se incluye la definición de los tipos de actividades compuestas, en otra los de las simples, en otra los tiempos de duración medidos empíricamente de las actividades simples y en otra los tiempos y distancias entre las localizaciones disponibles consideradas. La parte de recursos del PRD se encuentra en un archivo Excel distinto.

La otra entrada a destacar es el conjunto de uniones que se tomarán en consideración. Es posible tanto crear dicho conjunto de uniones como cargar la representación de un conjunto existente. Si se habla con propiedad únicamente se puede considerar que se trata de una entrada en este último caso, puesto que en el primero se generaría como parte de la ejecución del bloque.

7.2.2 Salidas

No se puede considerar que el bloque tenga salidas a nivel conceptual, pues no se genera ningún elemento de la solución nuevo, aunque sí se crea el documento de representación de la misma, con el formato descrito en la sección 7.1.4. A dicho documento se le vinculará de distintas formas los elementos correspondientes a la información de entrada requerida. Los archivos de Excel con las secciones del diccionario PRD de procesos, junto con la información logística, y recursos se vinculan mediante un hipervínculo en el árbol PPR del documento de representación general, concretamente en una sección denominada "Applications".

El modelo de producto, con su estructura denominada As Designed, se asigna como producto a la sección correspondiente del árbol PPR. El documento de tipo CATProcess que representa al conjunto de uniones se vincula añadiendo su dirección como uno de los atributos del elemento principal dentro de la sección de procesos del árbol PPR, el que representaría el proceso completo. Se ha denominado a dicho atributo "HL_JointsProcess".

Al iniciar la aplicación que implementa la metodología, se realiza una lectura de la información de las uniones, abriendo el archivo ubicado en la dirección almacenada y generando los objetos de clase Joint correspondientes, de forma que más adelante durante la ejecución se pueda acceder a dicha información de manera rápida.

Además, en caso de que el documento que contiene la información de las uniones se genere durante la ejecución de este primer bloque, en lugar de asociarse otro existente, se debe considerar dicho documento como otra de las salidas.

7.2.3 Funcionalidades del Bloque

La siguiente sección describe las funcionalidades que se han incluido en el Bloque 0. Principalmente se trata de la carga y lectura de la información que se debe asociar a la solución durante la ejecución del bloque. También se detalla cómo se vincula los archivos con la información requerida al documento que representa cada solución.

7.2.3.1 Carga de la vista As Designed

Dado que se requiere asignar el modelo del producto a una solución que se vaya a crear, la carga del mismo debe estar incluida como funcionalidad del bloque inicial. Se denomina vista As Designed dado que, en principio, proviene de la etapa de diseño del producto. Sin embargo la estructura de este modelo inicial no es relevante. Incluso se podría seleccionar un producto con la estructura de la vista As Planned de una solución anterior. Sólo es imprescindible que se encuentren todos los componentes individuales que se desee tomar en consideración para la definición del proceso de montaje.

La selección del archivo se realiza a través de un comando de CATIA que permite acceder a la interfaz para la gestión de archivos del sistema operativo (el famoso cuadro de diálogo de "Cargar" o "Guardar como"). Una vez se ha seleccionado un archivo de extensión CATProduct, éste se asocia al documento de representación de la solución, en la sección de productos del árbol PPR.

7.2.3.2 Carga de las condiciones iniciales

La información también conocida como condiciones iniciales debe venir recogida, en la primera implementación de la metodología que se ha desarrollado, en documentos de Excel. Concretamente, se requiere un documento con la parte del PRD dedicada a las actividades y la información logística y otro con la parte del PRD dedicado a recursos.

Los archivos descritos se asocian al documento de representación mediante un hipervínculo, que el entorno CATIA V5 permite generar e incluir en el árbol PPR, en una sección denominada "Applications".

7.2.3.3 Lectura de las condiciones iniciales

La lectura de la información de las condiciones iniciales, y la creación de los objetos adecuados para el acceso a la misma de manera eficiente, es una de las funcionalidades clave de este bloque. En la sección 5.3.1 se comenta que un diccionario PRD representa la información del conjunto de objetos específicos, de las clases contenidas en el meta modelo, con el que se podrá modelar el proceso de montaje a nivel conceptual. Un paso fundamental en ese proceso será, por tanto, la creación de los objetos de las clases adecuadas (clases ActivityType, ResourceType, ResourceModel, etc) según dicha información.

Se debe generar todos los objetos descritos en el PRD, y estos deben estar relacionados entre sí de la forma en que se describe: actividades hijas, recursos asignados y atributos son clases que están relacionadas, según el meta modelo. Las actividades hijas de una operación compuesta, o los recursos de una actividad, no se representan con objetos de clase ActivityType o ResourceType, sino con objetos ActivityObject y ResourceObject, aunque relacionados con el objeto que represente su tipo en cada caso.

Esta funcionalidad también incluye la lectura de las uniones del documento que las representa vinculado al documento de representación general y la creación de los objetos de clase Joint correspondientes, cada uno con los datos extraídos de su representación (nombre, tipo o número de elementos).

Esta funcionalidad se ejecuta por primera vez cuando se carga en el documento que representa la solución los archivos que incluyen la información. Posteriormente, aunque la solución se halle en estados de desarrollo más avanzados, al cargarla en una sesión es imprescindible la lectura de las condiciones iniciales, para obtener los objetos de las clases adecuadas con los que trabajar. En consecuencia, no se puede decir que la funcionalidad pertenezca completamente al bloque, aunque se haya incluido en esta sección.

7.2.3.4 Creación de las Uniones

Es posible la creación del conjunto de uniones que se empleará para definir el proceso de montaje, en lugar de la carga de un documento que represente uno ya existente. La creación de uniones se puede realizar únicamente si hay un modelo del producto asociado a la solución, y tras haber efectuado una lectura del mismo en la que se identifiquen sus componentes individuales.

Para que la metodología se pueda aplicar correctamente, debe haber un conjunto de uniones tal que cada componente individual del producto esté relacionado mediante uniones con el resto, lo que a su vez implica que haya al menos el mismo número de uniones que de componentes menos uno.

El procedimiento para crear cada unión consiste en la selección de los dos componentes que relacionará, la selección del tipo de unión, la especificación del número de elementos de que se compone (número de remaches, por ejemplo) y, de manera opcional, el nombre de la unión. Si no se indica un nombre, se asigna por defecto uno según el orden en que la unión fue creada.

La creación de las uniones no se corresponde con ninguna parte explícita de la metodología, pues las uniones forman parte de la información de partida, de la misma forma, la escritura de los archivos Excel que contienen el PRD tampoco se considera parte de la metodología. En el caso de la creación de las uniones, se ha desarrollado una interfaz que facilita su definición, así como la creación del documento que represente al conjunto de uniones. Dicha interfaz no se debe considerar una parte de la metodología, únicamente se ha definido para dar asistencia a su aplicación.

7.2.3.5 Carga de las Uniones

No es necesario crear las uniones para cada nueva solución o alternativa que se pretenda generar. Es posible cargar el archivo que representa a las uniones y vincularlo al documento que representa la solución, de la misma forma que se vincula el archivo cuando se decide crear las uniones desde el principio. En este caso el sistema también efectúa una lectura de las uniones que encuentra, y genera los objetos de la clase Joint adecuados.

7.2.3.6 Modificación de las Uniones

La modificación de las uniones se puede realizar de la misma forma que su creación, de nuevo se carga e inicia la interfaz para la creación, salvo que esta vez se trata de añadir nuevas uniones a la lista. No se ha desarrollado comandos para dar asistencia a la modificación de una unión ya definida, dado que, como se ha comentado, este paso no forma parte de la metodología propiamente dicha y, por tanto, dicho desarrollo no aportaría valor al trabajo que se presenta. Cualquier modificación que no consista en añadir o eliminar uniones se deberá realizar, en la primera implementación desarrollada de la metodología, de forma manual sobre el documento de representación de las uniones.

7.2.4 Programación

Esta sección describe cómo se ha implementado varias de las funcionalidades que se han definido para el Bloque 0. No se incluye la explicación de la codificación de funcionalidades que consistiera en tareas puramente rutinarias.

7.2.4.1 Lectura de las condiciones iniciales

La lectura de la información de las condiciones iniciales, PRD, información logística y conjunto de uniones, y su estructuración mediante la creación de los objetos de las clases adecuadas es imprescindible para la ejecución de la metodología. Para la implementación de este paso se tuvo en cuenta el formato que se ha empleado para almacenar dicha información en la primera implementación de la metodología: archivos de Excel. Por tanto, la lectura de la información se ha programado mediante bucles que recorren las distintas filas de la tabla, y van generando los objetos correctos cada vez que se encuentren elementos de ese tipo.

La lectura de la información y creación de objetos tiene una complicación, dada la forma en que se definen las actividades padre e hijas en el PRD. Como ya se ha comentado, al crear el objeto que representa una actividad compuesta, se requiere la adición de otras actividades hijas a la clase. Dicha clase es *ActivityType*, es decir, representa a un tipo de actividad. Sin embargo, al asignarle actividades hijas no se pueden asignar únicamente tipos genéricos, porque las hijas de una actividad compuesta ya se encuentran particularizadas en cierta forma.

Por tanto, las actividades hijas para el tipo de una actividad compuesta se representan como objetos *ActivityObject*; luego, para poder definir a estas hijas, primero se requerirá haber leído sus tipos correspondientes y creado los objetos *ActivityType* adecuados. Por esta razón, se debe leer primero las actividades simples, y después las compuestas de tipos a los que puedan pertenecer las actividades hijas de otras compuestas. Con los recursos ocurre algo análogo: al definir el objeto que representa un tipo de actividad, lo más habitual es que se requiera definir los recursos que necesita, lo que se hace mediante objetos *ResourceObject*, que se deben generar en ese momento. Sin embargo, para crear un objeto de clase *ResourceObject*, primero se debe haber definido el tipo de recurso al que pertenece. En consecuencia, se debe realizar la lectura de la parte de recursos antes que la de las actividades simples, y la lectura de éstas antes de las de las actividades compuestas, que se leerán de menor a mayor complejidad.

7.2.4.2 Creación de las Uniones

Para la definición de las uniones de un determinado producto se ha ideado una interfaz que permite especificar toda la información que se incluye en una unión e incluye la funcionalidad para crear el documento de tipo CATProcess que contenga todas las uniones definidas. La Figura 52 muestra la interfaz desarrollada con las funciones de los principales botones que en ella se incluyen.

Al pulsar el botón “Apply”, se genera de forma automática un nuevo documento de tipo CATProcess con la información de todas las uniones definidas. Además, se incluye la posibilidad de seleccionar los componentes sobre el entorno de representación, en lugar de seleccionarlos de una lista con todos los nombres.

7.2.4.3 Modificación de las Uniones

La metodología incluye la modificación de las uniones, para añadir nuevas, eliminar alguna de las existentes o modificar la información de alguna de las mismas, si bien esto último no se ha implementado todavía, aunque la creación de nuevas uniones demuestra que es posible. Esa modificación se habrá de realizar manualmente

Aunque no se ha implementado, la forma en que se ha diseñado la modificación del grupo de uniones sería también mediante la utilización de la interfaz descrita en el apartado 7.2.4.2

7.2.4.4 Interfaz

La mayoría de las funcionalidades definidas para el Bloque 0 descritas anteriormente en el mismo apartado, y cuya programación se detalla en la sección previa, se pueden lanzar mediante comandos de la interfaz general para la gestión del procedimiento. Dichos comandos son “Load initial Conditions”, “Load AS DESIGNED” y “Load joints”.

Sin embargo, para la creación de un nuevo conjunto de uniones del producto, o para la modificación de un conjunto dado, se requiere un mayor número de acciones por parte del usuario, por lo que ha sido necesario desarrollar una nueva interfaz. Mediante dicho cuadro de diálogo el usuario puede definir uniones del producto, mediante la selección de los 2 componentes de cada una, de su nombre y del tipo de unión.

La Figura 52 muestra dicha interfaz, con la explicación de los distintos controles que incluye, en el momento en que se está definiendo las uniones entre los componentes de lo que sería el ala derecha de un avión. La interfaz para la definición de uniones se aplica al producto completo cuyo montaje se está diseñando, nunca a partes del mismo. En el caso mostrado en la Figura 52, por tanto, el producto final que se ensamblará será dicha ala derecha.

Components list

La lista incluye todos los componentes individuales del producto para su selección

New joint definition area

Esta zona incluye los controles para la definición de una nueva unión y su adición al conjunto.

Select component

Asigna el componente seleccionado en la Components list como uno de los componentes de la unión.

Select component in CATIA V5

Permite la selección del componente directamente sobre la representación digital del producto.

Component name

Muestra el componente que se ha asignado a la unión.

Remove component

Desasigna el componente de la nueva unión.

Joint type selection list

Permite seleccionar un tipo para la nueva unión de entre los que hay disponibles por el PRD.

Add

Crea la nueva unión y la añade a la lista.

Defined Joints area

Esta zona incluye la lista de las nuevas uniones creadas y comandos para gestionarla.

Remove

Elimina una unión.

Cancel

Desecha toda la lista.

Representation file management area

Esta zona incluye los controles para gestionar los archivos CATProcess que representan conjuntos de uniones.

Save

Guarda el documento.

Save As Alternative

Guarda el documento en la dirección especificada.

Accept

Cierra la interfaz y genera las uniones en el documento.

Apply

Genera las uniones en el documento.

Cancel

Cierra la interfaz.

Figura 52: interfaz para asistir en la definición de las uniones y creación del documento que las representa.

Figura 53: interfaz para la definición de la vista As Planned junto con los resultados de su aplicación.

7.3 Bloque A: definición de la vista As Planned

El primer paso significativo para la definición conceptual del proceso de montaje, para un modelo de producto dado, es la determinación de la secuencia de ensamblaje [9][10][26]-[28]. En la metodología que se propone, dicha definición se realiza en dos momentos distintos: primero se agrupan los componentes en los distintos submontajes que se producirán, generando la vista As Planned del modelo; más adelante, se determinará la secuencia concreta según la cual se ensamblará cada submontaje. En el Bloque A del procedimiento que se propone, se define la estructura de la vista As Planned.

La estructura As Planned tiene mucho peso para el proceso de montaje, puesto que los submontajes que la componen deberán ser manipulados en las instalaciones industriales: deberán ser trasladados o posicionados en utillajes, por ejemplo. Además, en procesos distribuidos en plantas separadas geográficamente, como se considera en la metodología, cada submontaje se deberá transportar entre distintas localizaciones. Todo ello deja de manifiesto el impacto que la definición de los submontajes, que determinarán unas dimensiones y unos pesos determinados, tiene sobre las necesidades logísticas del proceso, y finalmente sobre los costes y los tiempos.

La Figura 53 muestra la interfaz desarrollada para implementar el Bloque A, con los distintos sub montajes que se están definiendo, y sus implicaciones, a la derecha para la nueva estructura de producto que se está creando, y a la izquierda para los nodos industriales que habrá en el proceso. La parte de la derecha es una captura de un documento general de representación de una solución.

7.3.1 Entradas y requisitos

La principal entrada para el bloque es el modelo de producto, sin importar la estructura en que estén agrupados los componentes. Únicamente se requiere que se hallen presentes todos los componentes individuales, en sus posiciones relativas finales del producto ensamblado.

También se requiere la información de las uniones entre componentes, dado que una funcionalidad de la etapa consiste en el chequeo de la factibilidad de los nodos definidos, en cuanto a las uniones que relacionan los componentes de cada nodo. Para que un nodo sea factible, es necesario que todos sus componentes estén relacionados con al menos otro de los incluidos en el sub montaje correspondiente.

Además, se comprueba que exista para cada sub montaje definido un medio con capacidad para transportarlo, aunque esta condición no es estrictamente necesaria para definir el plan logístico.

Los requisitos para la ejecución del Bloque A serán, por tanto, que la solución tenga asociado una vista del modelo de producto, lo que en la metodología se denomina vista As Designed, aunque en rigor no tiene que ser dicha estructura necesariamente; y que el conjunto de uniones del producto también esté presente. Para poder chequear la existencia de medios de transporte aptos para todos los sub montajes, también se requerirá la información logística. En la aplicación prototipo desarrollada como primera implementación se impone que se haya completado el Bloque O, es decir, que se haya asociado, además de la vista As Designed y el conjunto de uniones, el diccionario PRD. En los archivos que contienen la información del diccionario se incluye, también, en la primera implementación realizada, la información logística, que es necesaria para chequear que el transporte es factible.

7.3.2 Salidas

La salida del Bloque A será, evidentemente, la estructura de la vista As Planned del modelo de producto. Dicha estructura está compuesta por un conjunto de sub montaje que conforman las distintas partes del producto que se ensamblarán. Cada sub montaje de la vista As Planned tendrá asociado un nodo industrial, o centro de producción donde se realizarán las operaciones para su ensamblaje.

En la Figura 53 se muestran claramente las relaciones entre los sub montajes de la estructura de producto correspondiente a la vista As Planned y los nodos industriales entre los que se repartirá el montaje del producto.

La estructura de la vista As Planned vendrá dada por un nuevo elemento de tipo Product, con los mismos componentes que el modelo original, pero agrupados según los sub montajes definidos. Este nuevo elemento constituirá una de las salidas específicas del bloque. Por otro lado, el conjunto de los distintos nodos industriales asociados a los sub montajes también constituye una salida de la etapa. Dichos nodos se representan en el documento general de la solución mediante actividades en la sección de procesos del árbol PPR. Cada una de estas actividades tendrá asociado un documento que represente la línea de montaje asociada al nodo, mediante una propiedad que almacenará la ruta de acceso a dicho documento.

7.3.3 Funcionalidades

El Bloque A, al igual que la mayoría de pasos que componen la metodología, se ha diseñado partiendo de las distintas funcionalidades que se deseaba incluir en él. Para este bloque, la idea general era que debía producir la vista As Planned del modelo de producto, y se definieron diversas funcionalidades concretas que lo hicieran posible. Finalmente, se programaron y se diseñó una interfaz que permitiera el acceso a ellas.

7.3.3.1 Creación de sub montajes

La definición de la estructura de la vista As Planned está basada en la creación de sub montajes que la constituirán. Al iniciarse el bloque, de forma automática se analiza el modelo de producto asociado a la solución, y se obtiene todos sus componentes, sin importar su estructura. Luego los nombres de dichos componentes se incluyen en una lista en la interfaz, para que el usuario los pueda seleccionar para definir los nuevos sub montaje.

Se puede crear un nuevo sub montaje como hijo directo del nodo principal del producto, o bien como hijo de otro sub montaje existente. Para esto último habría que preseleccionar el sub montaje padre, de forma que se listasen sus hijos, tanto sub montajes como componentes individuales. Se crearía el nuevo sub montaje, especificando su nombre, y se incluirían como sus hijos los componentes que se deseara.

7.3.3.2 Comprobar factibilidad

El bloque incluye la posibilidad de chequear que los sub montajes definidos son factibles para el proceso de montaje. La condición que se ha establecido es que todos los sub montajes se puedan ensamblar mediante las uniones definidas para el producto. Más concretamente, se requiere que cada componente de cada sub montaje esté relacionado mediante una unión con alguno de los otros componentes o sub montajes hijos.

También se ha incluido en el diseño un comando que comprueba la factibilidad de transportar los distintos productos intermedios definidos. Si un determinado sub montaje es demasiado pesado para la capacidad de los medios de transporte disponible, seguirá siendo posible definir el proceso completo, si se ubica el nodo industrial asociado en la misma localización que el nodo de la línea de montaje final, con lo que el transporte mencionado no sería necesario. Sin embargo, se considera apropiado mostrar una advertencia en esos casos.

La comprobación de la factibilidad es una funcionalidad que no se ha incluido en el primer prototipo de la aplicación desarrollado. Ello se debe a que se ha demostrado, a través de la programación de aspectos similares, que su implementación es perfectamente posible y el esfuerzo en términos de tiempo necesario no se consideraba compensado por los beneficios, si bien se estima útil que se incluya esta funcionalidad en versiones posteriores de la aplicación.

7.3.3.3 Generar elemento de tipo Product con la estructura definida

Una vez se haya definido la estructura de la vista As Planned, será necesario la creación de un nuevo documento de tipo CATProduct, que incluya los componentes del modelo agrupados según dicha estructura. El sistema realiza esta acción de manera automática cuando se ejecuta el comando “Apply” o “Accept” de la interfaz diseñada para el bloque. El elemento de tipo Product de dicho documento se asociará al documento general de representación de la solución, a la parte de productos del árbol PPR, con el nombre AS PLANNED.

7.3.3.4 Generar representación de los nodos en el documento general

Además de generar un nuevo producto e importarlo al documento de representación, es necesario generar los elementos que representen los nodos industriales del proceso, que habrán quedado determinados por la configuración de la vista As Planned. Por cada sub montaje definido, se crea un objeto IndustrialNode, al que se le asocia los objetos PhysicalProduct y SubAssembly adecuados.

Se crea una nueva actividad en el árbol del documento general por cada objeto IndustrialNode definido. Además se asigna a dicha actividad, como producto, el sub montaje correspondiente de la vista As Planned, y se le pone un nombre del tipo de “Assembly of Center Fuselage”. Estas actividades representarán, por tanto, los nodos industriales de esa solución del proceso de montaje, e incluirán propiedades de los mismos, como el coste de transporte, de sus procesos y operaciones incluidas o su tiempo de ciclo.

7.3.4 Programación

En este apartado se detallará cómo se ha implementado diversos aspectos del bloque. Se incluye la explicación de la programación de aspectos que han requerido una solución de cierta complejidad, alejada de otras partes de la implementación más rutinarias.

7.3.4.1 Definición de la vista As Planned

La definición de la estructura de componentes que representa la vista As Planned ha sido relativamente sencilla de implementar. Basta con trabajar con las clases adecuadas del meta modelo. Se emplean objetos SubAssembly, PhysicalProduct y, paralelamente, IndustrialNode.

En primer lugar, se comienza capturando todos los componentes del modelo de producto en su vista As Designed, mediante una función recursiva definida para ello, denominada ListProducts. Dicha función se utiliza en diversas partes de la aplicación prototipo, y se explica con más detalle en la sección 8.2.2.4. Cuando se han encontrado todos los componentes, se define una estructura por defecto, con un único nodo de producto o sub montaje, y todos los componentes como hijos directos suyos.

El usuario puede añadir nuevos nodos de producto a la estructura por defecto, mediante los controles incluidos en la interfaz diseñada. Basta con seleccionar el nodo de producto al cual se añadirá el nuevo sub montaje como hijo y añadir los componentes que se desea la lista de los hijos del nuevo sub montaje. Cada vez que el usuario crea un nuevo sub montaje, se crea un nuevo objeto SubAssembly, se le asocian como hijos los PhysicalObjects correspondientes a los componentes que se han elegido como sus hijos, se borran como hijos del SubAssembly padre y se añade el nuevo objeto como hijo de este. Paralelamente, se procede de forma análoga con objetos IndustrialNode, asignándole a cada uno el objeto SubAssembly correspondiente al sub montaje adecuado.

Figura 54: algoritmo para la creación de un elemento tipo Product a partir de una estructura de objetos SubAssembly y PhysicalProduct.

7.3.4.2 Creación elemento de tipo Product con la estructura de la vista As Planned

Al ejecutar el comando “Apply” o “Accept”, se crea, de forma automática, un nuevo producto con los mismos componentes que el modelo inicial, agrupados en los sub montajes de la estructura de la vista As Planned. Ello se realiza mediante la ejecución de una función recursiva, CreateProductRecursively, cuyo algoritmo se muestra en la Figura 54.

Como se puede observar, la función se basa en la estructura de objetos SubAssembly definida, que va recorriendo de manera recursiva. Por cada SubAssembly, se crea un nuevo producto, se recorren todos sus objetos PhysicalProduct enlazados como hijos y se identifica los elementos de tipo Part correspondientes, que se añaden al nuevo producto como hijos. Si se encuentra un objeto SubAssembly asociado como hijo al que está siendo recorrido, se llama a la propia función para él y el producto obtenido se incluye como hijo del producto que se está definiendo.

7.3.5 Interfaz

Las acciones que se han definido para el Bloque A y que debe ejecutar el usuario se han incluido en los controles de la interfaz de la Figura 55. Se incluye una explicación de la función de los principales elementos de la misma.

Industrial nodes area

En esta zona se gestiona los nodos industriales definidos.

Subassemblies list

Muestra los sub montajes o nodos industriales definidos.

Rename

Se cambia el nombre del nodo seleccionado por la cadena que se haya escrito en la caja de texto de más abajo.

Enter

Se despliega el nodo industrial o sub montaje en la zona de la derecha, se mostrarán sus hijos actuales en dicha zona. Es equivalente a hacer doble click sobre un sub montaje de las listas Sub assemblies list o Current children list.

Reboot

Se retorna a la estructura por defecto, con un único sub montaje o nodo.

Check Transport

Comprueba que todos los sub montajes pueden ser transportados por alguno de los medios disponibles, y muestra una advertencia cuando se detecte que no es así.

Check Feasibility

Comprueba que todos los sub montajes se pueden ensamblar mediante las uniones existentes.

Sub assembly definition area

Esta zona incluye los controles para modificar los nodos de la estructura.

Current children list

Muestra los hijos actuales de un nodo o sub montaje. Si se pulsa el botón Enter o se hace doble click se desplegará el seleccionado de la lista, si es un nodo o sub montaje.

New node definition area

Permite definir nuevos nodos o sub montajes, como hijos del que está desplegado. Mediante el comando "Add", se añade el componente del nodo desplegado seleccionado de la Current children list como hijo del nuevo nodo. Con "Remove" se retira el nuevo hijo seleccionado. El comando "Add New Node" crea el nuevo nodo en la estructura.

Add existing node/component

Permite añadir otros nodos como hijos del nuevo.

Delete children

Permite eliminar hijos del nodo desplegado.

Hide/Accept/Apply/Cancel

Son comandos para la gestión de la interfaz. Respectivamente, permiten que se oculte, que se apliquen los cambios y se cierre, que únicamente se apliquen los cambios o que se cierre sin aplicar.

Figura 55: interfaz diseñada para la ejecución del Bloque A.

7.4 Bloque B: Definición de la línea de Montaje

El Bloque B de la metodología se orienta a la faceta del diseño conceptual del montaje correspondiente a la definición de la línea de montaje. Se debe precisar, en primer lugar, la configuración de la línea que se considera en los modelos que se proponen como base para la metodología.

Según dichos modelos, la actividad industrial estará repartida entre un número de centros, variable para cada alternativa o solución concreta del problema. En cada uno de estos centros, que en el modelo se han denominado nodos industriales, se ensamblará una parte del producto final, o sub montaje del mismo. Por lo tanto, en cada nodo industrial existirá una línea de montaje, con unos productos entrantes, un conjunto de operaciones distribuidas entre un número de estaciones y un producto saliente, que será la parte del producto cuyo ensamblaje se asocia a dicho nodo. La implicación de todo ello es que se debe ejecutar este bloque para todos los nodos definidos para el proceso global.

Como los procesos del Bloque B se deben ejecutar para cada uno de los nodos industriales de una solución, se requerirá un modo para seleccionar aquél cuya línea de montaje se desea definir. Al desarrollar la aplicación prototipo de implementación de la metodología, se ha incluido un cuadro de diálogo que permite al usuario seleccionar uno de los nodos, bien especificando su nombre, bien seleccionándolo de forma interactiva de entre las actividades que representan los distintos nodos en el documento general de representación de la solución.

La Figura 56 muestra dicho cuadro de diálogo, se permite escribir el nombre del nodo en cuadro de texto o, mediante el botón de su derecha, activar la selección interactiva en el documento de representación general. Una vez se ha seleccionado un nodo, se puede ejecutar el comando “Define”, para comenzar o continuar la definición de la línea asociada, o el comando “Define Alternative”, para definir una variante a partir de la línea en definición, con lo que se guardaría en un documento distinto. El cuadro se muestra al iniciar el Bloque B o el C, que también requiere la selección de un nodo, como se plantea en el diagrama de la Figura 48.

En cuanto al orden en que se debe definir la línea de los distintos nodos, no se impone ninguna restricción. Sin embargo, se recomienda comenzar por los nodos de mayor impacto en la solución, es decir, que impliquen los mayores componentes, el mayor volumen industrial y posiblemente un mayor tiempo de ciclo. De esa forma, es posible comenzar la distribución en planta de dichos nodos antes, y comprobar si la superficie requerida está dentro de los límites de las plantas disponibles o de la planta asignada, y redefinir la distribución de nodos industriales lo antes posible si no es así. Que los nodos de mayor impacto estén definidos incrementa la precisión al ejecutar el Bloque D, pues se dispone de mayor información, precisamente de las partes que pueden suponer mayores costes o requisitos de transporte.

Dado que en el Bloque B se definen las líneas asociadas a todos los nodos industriales definidos para el proceso, se debe especificar las acciones que incluye esta definición. Se considera que una línea de montaje está definida, para el nivel de detalle hacia el que se orienta la metodología, cuando tiene asociada una lista completa con todas las operaciones que incluye, distribuidas en unas estaciones y con unos recursos específicos asignados.

Figura 56: cuadro de diálogo para la selección de un nodo industrial.

Para alcanzar el estado descrito, se ha definido una serie de etapas que incluyen las acciones necesarias. En una primera etapa, se ordena en una secuencia la realización de las uniones entre los componentes del producto que se desea ensamblar en la línea, o sub montaje del producto principal. Esta ordenación se denomina secuencia de montaje. Eso ya establece los productos intermedios que se irán ensamblando en la línea y una primera configuración de la misma en cuanto a estaciones, si se considera que cada puesto de la secuencia representa una estación.

En la segunda etapa del bloque, se obtienen todas las operaciones que incluye cada unión, según su tipo definido en el PRD, y el usuario debe distribuirlas entre las estaciones que decida, partiendo de la distribución preliminar de la etapa anterior. Se permite mover operaciones entre estaciones, o crear y destruir operaciones y estaciones. Todo ello se debe realizar respetando unas restricciones de precedencia especificadas también en el PRD, y que vienen impuestas en la primera implementación de la metodología.

En la tercera etapa el usuario debe concretar la variante de las actividades que no estuvieran totalmente definidas, y especificar los recursos asignados a todas, partiendo de los tipos de recursos que cada tipo de actividad necesita, según su definición en el PRD. Para cada asignación en esta etapa, se pueden comprobar las implicaciones, pues se puede proporcionar el valor actualizado de los atributos de todas las actividades y estaciones presentes en el nodo. Al aplicar los cambios de esta etapa, se cargan en el documento de representación de la línea los modelos digitales de todos los recursos asignados.

Existe una última etapa que no contribuye a la definición de la línea, sino a su evaluación. Al ejecutarla, se calcula el valor de los atributos de la línea que influyan en la solución general, como costes, tiempos, eficiencia del uso de recursos y sus incertidumbres.

Figura 57: definición de la línea de montaje por etapas

La Figura 57 ilustra la ejecución del Bloque B. En el ejemplo, se muestra una línea que implica las uniones llamadas J1 a J8 de un producto. Tras una primera ordenación, se pasa a la definición de las estaciones de la línea. En el ejemplo, se distribuye las actividades para la realización de las uniones J4 a J7 en 3 estaciones separadas, y se elimina de forma automática las actividades repetitivas, debidas a la inclusión de operaciones del mismo tipo de unión en la misma estación. Finalmente se asignan los recursos finales a las actividades de la línea. El paso de definir la distribución en planta (Lay Out) también se incluye en el diagrama, pues se puede realizar en este punto, si bien pertenece a un bloque distinto.

Las etapas descritas se deben ejecutar de manera lineal, en el orden en que se ha descrito. Para ello se ha definido un estado de definición de cada línea. Existen 4 posibles valores para dicho estado: Initial, si no se ha completado la primera etapa; Joints_Sequenced, si se ha terminado adecuadamente la primera etapa; Stations_Created, si se ha ejecutado adecuadamente la segunda y Resources_Assigned, si se ha concluido la tercera. Para obligar a la ejecución en orden de las etapas, el cuadro de diálogo que contiene los comandos para iniciar cada etapa se ha desarrollado de forma que, según el estado de esa parte de la solución, sólo se muestran como disponibles los botones adecuados.

Al iniciar o retomar la definición de una línea, el sistema debe averiguar de forma rápida en qué estado se encuentra, para permitir el uso de unos botones u otros. Para ello se ha definido una propiedad, que se incluye como atributo del nodo principal de la estructura de procesos del árbol PPR, que almacena el nombre del estado en que se encuentra la solución. Dicha propiedad se ha denominado Process definition state, y se ha creado dentro del entorno, asociada al nodo mayor de la estructura de procesos del documento general de representación. La Figura 58 muestra capturas con el cuadro de diálogo del Bloque en los distintos estados de definición posibles.

Se puede considerar que el Bloque B está basado en el conocimiento. Partiendo de un conocimiento del proceso de montaje, que está recogido en una librería de actividades y recursos, se puede generar la estructura de procesos y recursos completa de una línea de montaje, mediante la realización de un conjunto de acciones concretas por parte del usuario.

Como entradas para el Bloque B, se incluye la estructura de la vista As Planned, ya que determina los nodos industriales de la solución, en cuanto a su número y sub montajes que tienen asociados y el diccionario PPR, puesto que la información que contiene es necesaria para la definición de las operaciones de la línea de montaje. Por tanto, una vez ejecutado el Bloque A, se cumplen todos los requisitos para poder ejecutar el Bloque B para alguno de los nodos industriales de la solución.

La salida más importante de la etapa será la línea de montaje asociada a un nodo industrial, totalmente definida y representada en un documento CATProcess del entorno CATIA, con los modelos digitales de los productos y recursos asignados a las operaciones de las distintas estaciones cargados, listas para el diseño de la distribución en planta. Además, si se lanza la última etapa del bloque, se realiza una evaluación del nodo y se exportan los resultados.

Figura 58: asistente para la definición de la línea según el grado de desarrollo.

Figura 59: interfaz de la etapa 1 del bloque y su correspondencia con la estructura de la vista As Prepared generada.

7.4.1 Etapa 1: Secuenciación de los procesos de unión.

La primera etapa del bloque para la definición de una línea de montaje consiste en la generación de una estructura del producto asociado que determine la manera en que se ensamblará. Dicha estructura se corresponde con la vista As Prepared del modelo, y viene determinada por la secuencia en que se ordene la realización de las uniones entre componentes y sub montajes, también denominada secuencia de montaje.

La Figura 59 muestra la interfaz diseñada para esta etapa, junto con capturas de los resultados de su aplicación que, como se explicará en esta sección, son la parte de la vista As Prepared correspondiente al sub montaje del producto que se ensamblará en la línea, y un conjunto de estaciones preliminares, como primera aproximación a la línea de montaje final. Dichas estaciones tendrán asociados los productos entrantes adecuados, de la estructura As Prepared definida. Los dos resultados se obtienen al pulsar los botones “Apply” y “Create”, respectivamente.

En la sección se detallarán los requisitos para la ejecución de esta etapa, así como las entradas que necesita, también las salidas o resultados de la misma, las funcionalidades que incluye, la forma en que estas funcionalidades se programaron y una explicación de la interfaz diseñada.

7.4.1.1 Entradas y requisitos

Como requisitos para la ejecución de esta etapa, quizá el más importante es la existencia de una estructura As Planned ya definida. El objetivo es secuenciar las uniones cuya realización conduce al ensamblaje del producto intermedio o sub montaje asociado al nodo industrial. Dicho sub montaje pertenece a la estructura de la vista As Planned y, dado que la metodología no incluye la definición parcial de la misma, se hace necesario que el total se halle totalmente definido.

Evidentemente, otro requisito para poder iniciar esta etapa es la existencia de un conjunto de uniones que relacionen todos los componentes del modelo de producto con el resto. La asociación del conjunto de uniones constituye parte de uno de los bloques que se deben completar de manera obligatoria antes de alcanzar esta etapa, pero es cierto que para otros pasos anteriores no son estrictamente necesarias.

Una de las entradas para este proceso es el producto intermedio asociado al nodo industrial. Como entrada, únicamente se precisa de esa parte, no es necesario disponer del producto As Planned completo. Ya se ha comentado que no se permite la definición parcial del As Planned, pero, en rigor, la única entrada del proceso sería el sub montaje del As Planned correspondiente, es decir, el producto intermedio que se ensambla en la línea de montaje del nodo.

Al completar el Bloque A, o definición de la estructura As Planned, el sistema genera automáticamente los nodos industriales, que representa en el entorno de trabajo como actividades en el proceso del documento CATProcess general; y asocia a cada nodo el sub montaje correspondiente. Por ello, al comenzar a definir la línea de montaje de un nodo industrial, no se requiere que el usuario seleccione el sub montaje, el sistema ya lo asoció de forma automática con anterioridad.

Para el caso de las uniones, se considera que la entrada requerida en la etapa coincide con el requisito: el conjunto completo de las uniones del modelo del producto. Si bien para ejecución de los procesos principales de la etapa únicamente se necesita el sub conjunto de las uniones directamente relacionadas con el nodo, la segregación del mismo se realiza dentro de la propia etapa, de forma automática. Se considera, por tanto que la entrada es el total de las uniones y, de nuevo, no es necesario que el usuario las seleccione, pues éstas ya se encuentran vinculadas a la alternativa desde los primeros pasos de la metodología. El documento CATProcess que contiene la definición de todas las uniones (como se detalla en la sección 5.3.3.2) queda asociado al documento que representa a una alternativa gracias a que se almacena la ruta del primero como una propiedad de texto en el nodo de procesos principal dentro del segundo.

7.4.1.2 Salidas de la etapa

A continuación se describirán los distintos elementos salientes que se generan al aplicar esta etapa del Bloque B de la metodología. También se puede entender como los resultados esperados de la ejecución de este paso.

La aplicación de esta etapa conduce a la generación de la vista del modelo de producto denominada As Prepared, en la que los componentes y sub montajes se agrupan atendiendo a la forma en que se van a ensamblar. En realidad, esta estructura refleja la secuencia de realización de las distintas uniones, o secuencia de montaje [6][9][17][26][30]. Así, si varios componentes se ensamblan (entre sí o al conjunto en proceso de montaje) de forma conjunta, pertenecerán al mismo nodo de la estructura As Prepared; mientras que, en una secuencia en la que primero se ensambla un componente A al conjunto y posteriormente uno B, la estructura tendrá un nodo superior con dos hijos: B y el conjunto al que se uniría, que a su vez tendría como nodos hijos a A y al conjunto anterior al que se ensambló A.

La estructura de la vista As Prepared no es la única salida de la etapa. Además, se genera una primera configuración de la línea de montaje del nodo industrial. Eso incluye la creación de un conjunto preliminar de estaciones, según la secuencia definida para la realización de las uniones. Se considera que las uniones que se ejecutan de manera simultánea se realizan dentro de una misma estación y las estaciones se relacionan entre sí mediante restricciones de precedencia según el orden establecido en la secuencia. A cada estación se le asignan, como productos entrantes o “Items”, los hijos directos del sub montaje que se produciría al ejecutar las uniones comprendidas dentro de dicha estación. En otras palabras, dichos “Items” llegan a la estación, se ensamblan al ejecutar las uniones asociadas y el conjunto resultante constituye el sub montaje asociado a la estación.

De esta forma, aunque posteriormente el usuario puede introducir modificaciones, ya queda determinado el conjunto de operaciones de montaje que se deberá llevar a cabo en la línea de montaje. Este punto representa el momento de la metodología en el que se pasa de definir estructuras de producto a diseñar la estructura del proceso de montaje.

7.4.1.3 Funcionalidades

Esta primera etapa del Bloque B se ha diseñado mediante el desarrollo de un conjunto de utilidades, o funcionalidades que, ejecutadas de manera adecuada, conducen a la obtención de los resultados esperados de la etapa a partir de las entradas de la misma. Para esta etapa consisten en la selección automática de las uniones implicadas, la definición de la secuencia de ejecución de las mismas, la creación de la parte de la estructura As Prepared correspondiente al nodo industrial y la creación de un conjunto de estaciones preliminares, definidas y unidas de forma adecuada.

7.4.1.3.1 Selección de las uniones involucradas en el nodo industrial

El primer paso que se ejecuta en la etapa lo realiza el sistema de forma automática, con el inicio de la misma. Se trata de la identificación de las uniones que se deberían realizar en la línea de montaje asociada al nodo industrial. Ello dependerá de los sub montajes y componentes que configuren la estructura del producto que se ensamblará en el nodo. Dicha estructura se corresponderá con una parte de la vista As Planned del producto completo.

Por ejemplo, sea una estructura de tipo As Planned que incluya un sub montaje denominado “Fuselaje”, que esté formado por 3 sub montajes hijos, el “Fuselaje Delantero” (FD), el “Fuselaje Central” (FC) y el “Fuselaje de Cola” (FR), y el componente individual “Cajón Central” (CC); en el nodo industrial destinado al ensamblaje del sub montaje padre, se deberán ejecutar las uniones entre los 3 submontajes y el componente, un total de al menos 4 uniones. Los componentes que enlace cada unión y el número de las mismas puede variar según el caso, una posible configuración sería una Unión A, entre las partes inferiores del FD y el FC; una Unión B entre el CC y la parte superior del FC; una Unión C entre las partes superiores del FD y el FC y las uniones D y E entre las partes superiores e inferiores, respectivamente del FC y el FR.

El ejemplo descrito se trata de un conjunto de uniones de ciclo cerrado, pues desde cada componente se puede alcanzar algún otro punto del conjunto desde más de un camino distinto. Esto está soportado por el modelo, aunque no es un requisito. Sí se exige que los conjuntos de uniones sean al menos de cadena abierta, es decir, que desde un componente dado se pueda alcanzar cualquier otro mediante al menos una secuencia de uniones.

La identificación de las uniones involucradas en la línea que se está definiendo se realiza mediante una búsqueda en el conjunto de uniones del modelo de producto, según los componentes que tenga asociado. Para el ejemplo anterior, se buscarían aquellas uniones entre componentes que pertenecieran a distintos sub montajes de los asignados, o entre alguno de ellos y el componente individual CC. Las uniones entre componentes pertenecientes a un mismo sub montaje de los asignados no se realizarían en la línea que se está definiendo, sino en la del nodo industrial al que dicho sub montaje estuviera directamente asignado como producto saliente.

Cuando se han identificado las uniones adecuadas, se crean los objetos de clase Joint que los representan y se asocia dicha información al formulario desarrollado para esta etapa, para que, a través de la interfaz diseñada, el usuario pueda definir la secuencia de ejecución de las uniones.

7.4.1.3.2 Definición de la secuencia de uniones

La principal utilidad de esta etapa es la secuenciación de las uniones que están asociadas al nodo industrial cuya línea se está definiendo en el bloque. Para ello, el sistema primero debe identificar las uniones adecuadas, y después ordenarlas en una secuencia preliminar que el usuario puede modificar mediante los comandos que presenta el formulario de la etapa.

Previamente, el sistema crea los objetos de clase Joint del modelo, a partir de la información del documento CATProcess que contiene todos los procesos de unión. Luego se selecciona, también de forma automática, las uniones asociadas al nodo industrial correspondiente, es decir, aquéllas que se deben completar en la línea de montaje para ensamblar el sub montaje que se fabrica en dicho nodo. La determinación de dichas uniones no es trivial, y para ello se ha requerido diseñar y codificar varias funciones que se detallan en la sección 7.4.1.4.1.

Una vez se han seleccionado los objetos de clase Joint relacionados con el nodo, se genera una secuencia preliminar. Para ello se emplean los campos Previous y Next de la clase Joint, de forma que todos los objetos seleccionados quedan unidos de forma lineal. Se sigue el orden en el que se han identificado las uniones del nodo industrial.

En la interfaz, se muestra entonces la información de los elementos que intervienen en la etapa. La Figura 59 muestra una captura de dicha interfaz. En el centro se ha colocado una lista con las uniones asociadas, en el orden en el que se han secuenciado por defecto. Además, cuando se preselecciona una unión de la lista, se muestra el nombre de los componentes que la unión ensamblaría entre sí y de las uniones que se ha establecido como simultáneas (por defecto no se establecen uniones simultáneas, es una modificación que sólo puede hacer el usuario). En la zona izquierda se muestran tanto los sub montajes como los componentes individuales que se deben ensamblar a través de las uniones asociadas al nodo.

7.4.1.3.3 Generación de la estructura As Prepared según la secuencia de uniones

La inclusión de las uniones del producto asociado al nodo en una secuencia definirá el orden en que las distintas partes han de ser ensambladas y, en consecuencia, una nueva estructura del producto. Dicha estructura se corresponderá con una parte de la vista As Prepared del modelo de producto.

Para generar la estructura As Prepared, se deben ejecutar dos pasos. El primero se denomina establecer la secuencia, y se realiza sin tener en cuenta las uniones designadas como simultáneas, consiste en la creación de una estructura como si las uniones se ejecutasen una detrás de otra, de forma que las simultáneas se considerarían consecutivas. La estructura generada está formada por datos, aún no se crea ningún elemento dentro del entorno de CATIA V5. Se recorre la secuencia de uniones, desde la primera hasta la última y, para cada una, se genera un objeto de clase SubAssembly al que se asignará como hijos, en caso de que incluyan a uno de los dos componentes de la unión, sub montajes resultado de uniones previas en la secuencia, sub montajes ya existentes asignados al nodo o los componentes individuales.

El paso de establecer la secuencia se inicia al pulsar el botón “Set Sequence” de la interfaz. Una vez pulsado, se activa el botón “Apply”, que sirve para ejecutar el sub programa que generará el nuevo producto con la estructura correspondiente a la vista As Prepared parcial que la secuencia de uniones define. Dado que en el paso anterior ya se ha creado una estructura de objetos de tipo SubAssembly, aunque sin tener en cuenta las uniones simultáneas, en este se reorganizan los objetos que estén asociados a ellas.

Se repasa la secuencia y, cuando se encuentra una unión designada como simultánea de la anterior, se crea un nuevo SubAssembly, equivalente a la unión de los asociados a todas las uniones de ese grupo simultáneo. El SubAssembly equivalente tendrá como hijos los de los objetos SubAssembly anteriores, excepto los que correspondan a otro de ellos. De ese modo, se obtiene un conjunto de objetos de las clases SubAssembly y PhysicalProduct (representa los componentes individuales), relacionados entre sí según la estructura de la vista As Prepared parcial definida.

Finalmente, se crea un nuevo producto en el entorno de CATIA V5, con la estructura definida previamente. Para ello, se ejecuta una función recursiva desarrollada con ese objetivo: la creación de elementos de tipo Product en un documento de CATIA a partir de una estructura de objetos SubAssembly y PhysicalProduct.

7.4.1.3.4 Creación de estaciones preliminares de la línea

La secuencia de uniones creada define un grupo de estaciones, si se considera que cada unión o grupo de uniones simultáneas se ejecuta en una. Dichas estaciones constituyen una primera aproximación a la configuración final de la línea de montaje y serán la entrada a la siguiente etapa del bloque. La generación de las estaciones en el documento CATIA que representa la línea de montaje se inicia cuando el usuario ejecuta el comando "Create".

Cada estación se crea dentro del entorno virtual como una actividad dentro de la estructura de procesos. Así, el sistema repasa la secuencia de uniones desde la primera y crea de forma automática, para cada unión o grupo de simultáneas, una actividad dentro del archivo CATProcess que representa la línea. Además, el orden que siguen las estaciones queda también almacenado en el documento, puesto que las actividades se vinculan mediante restricciones de precedencia.

Figura 60: estaciones preliminares y productos asociados, resultantes de la ejecución de la etapa 1 del Bloque B.

En cuanto a la sección de productos de la estructura PPR del documento, el As Prepared creado se asocia a ella, pero con eso no es suficiente. A cada estación se debe asignar 2 o más productos, ya sean sub montajes o componentes individuales, que serán los que sean ensamblados en ella durante cada ciclo. Ello supone un dilema: ¿bastaría con asignar simplemente los productos hijos del As Prepared a las estaciones adecuadas? La respuesta es no. Si se procede así, se produce la incongruencia de que, mientras un sub montaje está asignado a una estación, uno o varios de sus hijos están asignados a otras diferentes. No hay que olvidar que es distinto hablar de los sub montajes de un producto a nivel conceptual y de las instancias o unidades de ellos que se encontrarán físicamente presentes en la planta.

Por todo ello en esta etapa, no se asigna únicamente el producto con la estructura As Prepared, sino que se incluye unidades adicionales de los distintos submontajes hijos del mismo. Los productos incluidos en el documento se asignan a las estaciones preliminares de forma que, si en una determinada estación genera un sub montaje, a dicha estación lo que se asigna son los hijos de este último.

La Figura 60 muestra los resultados obtenidos tras aplicar esta etapa. Queda patente que se ha generado 4 estaciones, según los grupos de uniones simultáneas definidos. Además, dichas estaciones se han relacionado mediante restricciones de precedencia, como se observa en el diagrama PERT. Se ha añadido a la sección de productos del árbol, de forma separada, los distintos sub montajes incluidos dentro del As Prepared. Dado que en la primera estación se ensambla el producto “Complex Assembly n4”, se le ha asignado los 3 hijos de éste, “Rear Section”, “Nose Fuselage” y “Fuselage”.

7.4.1.4 Programación

Para la aplicación de la etapa en un entorno de representación tridimensional como, en este caso, CATIA V5, es necesario programar todas las funcionalidades que se desea que incluya, y definir controles para que el usuario pueda ejecutarlas. En este apartado se explica cómo se han programado las principales funcionalidades de esta primera etapa.

7.4.1.4.1 Selección automática de las uniones involucradas en el nodo industrial

Antes de cualquier otra acción, es necesario un paso previo en el que se crean los objetos con los que se va a trabajar, a partir de la información existente en el sistema. El sistema hace un repaso de forma automática por el documento de tipo CATProcess que contiene la información de todas las uniones del modelo de producto. Por cada una, se crea un objeto de clase Joint, y se rellena la información de sus campos. Además, se crean objetos de clase PhysicalProduct que representan los componentes que tiene asociados.

La Figura 61 muestra el diagrama de flujo del procedimiento general para la identificación de las uniones implicadas. El algoritmo se basa en la búsqueda de las uniones entre los componentes o sub montajes hijos directos del sub montaje asociado al nodo industrial. Para ello, primero se recorre mediante un bucle todas las uniones asociadas al producto completo encontradas. Para cada unión se recorren sus 2 componentes asociados: si alguno de ellos ni es un componente individual hijo directo del sub montaje principal, ni pertenece a algún sub montaje hijo o “descendiente” del principal, la unión se considera no relacionada con el nodo industrial.

Si una unión ha pasado el filtro descrito, pero ambos componentes pertenecen a sub montajes hijos del principal, se debe determinar si su ensamblaje se debe producir en el nodo industrial actual, o pertenecen a nodos previos del proceso de montaje. Si la unión perteneciera al nodo actual, los submontajes deberían ser hijos directos del sub montaje principal asociado. Sin embargo, comprobar esto de forma automática no es sencillo. Para ello se ejecuta la sub rutina “FindCommonRelative”, que sigue el diagrama de flujo de la Figura 62.

Figura 61: diagrama de flujo para la identificación de las uniones asociadas a un sub montaje.

Figura 62: diagrama de flujo para identificación dl sub montaje antecesor común más cercano de dos sub montajes.

Se trata de una función recursiva, en la que primero se comparan los niveles de los sub montajes entrantes. Se puede definir como nivel de un sub montaje al número de “antecedentes” (sub montaje padre, padres de este, etc) que posee; el nivel se determina fácilmente mediante la función recursiva “Level” de cada objeto SubAssembly. Si uno de los sub montajes de entrada tiene un nivel mayor que el otro, se llama de nuevo a la función, pero se dicho elemento reemplazará como entrada por su padre. Si los dos tienen el mismo nivel, pero no tienen el mismo padre (los nombres de sus padres no coinciden), se llama de nuevo a la función, empleando como entradas los padres de los sub montajes que fueron las entradas de la llamada anterior.

Si el nodo antecesor común de los sub montajes asociados a una unión coincide con el sub montaje principal asociado al nodo industrial, se considera que dichos sub montajes se ensamblan en la línea del nodo, es decir, que la unión que los relaciona está implicada en el mismo. Tras repasar todas las uniones del modelo, se obtiene el sub grupo de las que se deben ejecutar en la línea de montaje que se está definiendo. Dichas uniones se deberán secuenciar más adelante en esta etapa.

Las uniones implicadas encontradas se muestran, ordenadas de forma preliminar según el orden en el que se hallaron, en la lista de la parte izquierda del cuadro derecho de la interfaz.

7.4.1.4.2 Definición y modificación de la secuencia de uniones

El papel principal que desempeña el usuario en esta etapa es la definición de la secuencia en la que se deben realizar las uniones implicadas en la línea de montaje. Cada puesto en la secuencia implica la ejecución de una unión o de varias simultáneas, y representará una estación preliminar de la línea, pendiente de modificaciones en posteriores etapas del bloque.

Por tanto, las acciones que el usuario debe realizar son de dos tipos: desplazar una unión dentro de la secuencia (hacia puestos previos o posteriores) y determinar que dos uniones son simultáneas. Para el primer tipo se ha desarrollado los comandos “Up” y “Down”, que permiten, respectivamente, el intercambio de una unión con la predecesora o la sucesora en la secuencia. Al ejecutar ese tipo de acción, los cambios resultantes se actualizan en la lista de la interfaz que muestra la secuencia de uniones.

Para definir que una unión se ejecuta de manera simultánea a otra, primero se debe posicionar en la secuencia como la sucesora de esta última. Después, al ejecutar el comando “Simult.”, queda establecido que ambas uniones pertenecen al mismo puesto dentro de la secuencia. Si se pulsa “Delete Simult.”, todas las relaciones de simultaneidad de la unión seleccionada de la secuencia se anulan. La simultaneidad de una determinada unión con otras en la secuencia se puede visualizar en la lista de la parte superior derecha de la interfaz, si se pincha sobre la unión en la lista que muestra la secuencia (ver Figura 65).

Los objetos de clase Joint que representan las uniones implicadas en el nodo industrial se encuentran, desde prácticamente el inicio de la etapa, relacionados entre sí mediante sus campos “Previous”, “Next” y “Simultaneous”, como muestra el diagrama del meta modelo de la Figura 23. Cada vez que el usuario realiza una acción de las descritas anteriormente, la secuencia de las uniones cambia, por lo que se debe modificar las relaciones entre los objetos correspondientes.

Así, si una unión avanza un puesto dentro de la secuencia, el objeto Joint se establecerá como el “Next” del objeto en el puesto previo a ese, mientras que este último se establecerá como el “Previous” de aquél; por otro lado, el objeto que anteriormente ocupaba el puesto se establecerá como el “Next” del objeto Joint que se ha desplazado, que se establecerá a su vez como el “Previous” de aquél. En total se debe programar 4 cambios en las relaciones entre objetos para cada cambio en la secuencia.

Al ejecutar “Simult.”, simplemente el objeto Joint de la unión seleccionada se incluye dentro del grupo “Simultaneous” de la unión previa en la secuencia, y viceversa. Al pulsar “Delete Simult.”, se vacía el grupo “Simultaneous” del objeto Joint de la unión seleccionada y de los de sus uniones simultáneas.

7.4.1.4.3 Generación de la estructura As Prepared según la secuencia de uniones

La generación de la estructura parcial As Prepared se ha automatizado de forma que se ejecuta en 2 pasos separados. En primer lugar se realiza lo que se ha denominado “establecer la secuencia” (Set Sequence), luego dicha secuencia se “aplica” (pulsando “Apply”).

Se denomina establecer la secuencia al paso en el que se genera una estructura de objetos de clase SubAssembly y PhysicalProduct, asociados entre sí mediante relaciones de tipo “padre-hijo”, consecuente con la secuencia de ejecución de las uniones definida en ese momento en la interfaz. Dicha estructura se correspondería con la vista As Prepared, pero en este primer paso, no se tienen en cuenta relaciones de simultaneidad, sino que se considera que se trata de una secuencia lineal. Tras ejecutar este paso, a cada unión de la lista se le asocia no ya componentes individuales, sino los 2 sub montajes definitivos que quedarían ensamblados tras su ejecución, según su posición en la secuencia.

La Figura 63 muestra el diagrama de flujo de este primer paso. En el proceso se recorre las uniones asociadas, según su orden en la secuencia. Para cada unión se crea un objeto auxiliar de clase SubAssembly al que se asociará 2 hijos, correspondientes a los 2 componentes que relaciona la unión. Si un componente pertenece a otro SubAssembly auxiliar creado al repasar una unión previa de la secuencia, lo que se asociará como hijo será dicho SubAssembly, en lugar del componente. Si el componente pertenece a un SubAssembly correspondiente a un sub montaje que ya existía en la estructura As Planned, también se asocia dicho SubAssembly como hijo.

Tras repasar todas las uniones implicadas, se obtiene una estructura con todos los objetos SubAssembly y PhysicalProduct correspondientes al sub montaje de la vista As Planned asociado al nodo industrial. Dicha estructura también contendrá los sub montajes auxiliares generados, y corresponde a un paso intermedio de la definición de la estructura As Prepared.

Figura 63: diagrama de flujo del procedimiento para establecer una secuencia, o generar la estructura de sub montajes asociada intermedia.

Se debe destacar que esta estructura no contempla que existan uniones que se ejecutan de manera simultánea en un mismo puesto de la secuencia, por lo que implicarían un único sub montaje auxiliar. Una vez completado este primer paso, los sub montajes o componentes definitivos asociados a cada unión se pueden visualizar al seleccionarla de la lista.

El paso intermedio se ha denominado aplicar y consiste en la definición de la estructura As Prepared correspondiente a la secuencia de uniones que se ha definido, a nivel de objetos y ya teniendo en cuenta las relaciones de simultaneidad. En definitiva se trata de modificar la estructura intermedia obtenida del paso anterior. La Figura 64 muestra el diagrama de flujo que se sigue al ejecutar este procedimiento.

Como se puede observar en la Figura 64, se realiza un repaso por todas las uniones del nodo industrial, según el orden establecido en la secuencia. Cuando se detecta que una determinada unión se ha definido como simultánea de otras, se crea un objeto SubAssembly único para todas las uniones simultáneas de la primera. Dicho SubAssembly debe ser equivalente a la suma de los que estaban asociados a las uniones simultáneas, es decir, debe tener como hijos los de aquéllos, descontando los hijos coincidentes con alguno de ellos mismos. Al continuar el repaso, se pasa por alto las uniones simultáneas de las que se acaban de repasar.

Tras la ejecución del procedimiento descrito, la estructura de objetos SubAssembly y PhysicalProduct resultante se corresponde ya con la de la parte de la vista As Prepared asociada al nodo industrial. Entonces, el sistema crea de manera automática un documento de tipo CATProduct con los componentes y submontajes adecuados, siguiendo dicha estructura. El nodo principal o sub montaje de dicho producto se denominará "AS PREPARED".

Para la creación del producto descrito, se llama a la función "CreateProductRecursively", empleada también el Bloque A para la creación de un producto con la estructura de la vista As Planned definida, tal y como se detalla en la sección 7.3.2. El diagrama de flujo de dicha función se muestra en la Figura 54. Como se puede observar, se trata de nuevo de una función recursiva, en la cual se realiza una llamada a sí misma para la creación de los sub montajes hijos del sub montaje que está siendo creado.

Figura 64: diagrama de flujo del procedimiento de aplicar una secuencia dada.

Tras la llamada a “CreateProductRecursively”, se obtiene, por tanto, un producto con la estructura de la parte de la vista As Prepared correspondiente, determinada por la secuencia que se ha definido. El sistema, de forma automática también, importa dicho producto al documento de tipo CATProcess que representa la línea de montaje que se está definiendo.

Se podría haber definido un procedimiento que encadenara de forma automática los 2 pasos descritos, pero se ha juzgado más adecuado que el usuario pueda comprobar los resultados de la aplicación de cada uno, para poder rectificar en caso necesario. Por ejemplo, al pulsar “Set Sequence” se puede dar el caso de que alguno de los sub montajes auxiliares resultantes, o la configuración entera del futuro As Prepared, presente algún inconveniente según el criterio del usuario. En ese caso, aún sería posible una modificación de la secuencia de montaje antes de generar el producto con la estructura de la vista As Prepared asociada.

7.4.1.4.4 Creación de estaciones preliminares de la línea

La última de las funcionalidades que se han incluido en esta etapa, consiste en la generación de un conjunto de estaciones coherente con la secuencia de montaje que se ha definido. Este conjunto representa una primera aproximación de la configuración de la línea de montaje, que se verá modificada en las siguientes etapas.

Por defecto, se considera que cada puesto en la secuencia de montaje representa una estación de la línea. Según cómo se haya definido la secuencia puede haber una o varias uniones simultáneas asociadas a un puesto, al igual que en el modelo se incluye la posibilidad de que en una estación se realicen las tareas (o parte de ellas, dependiendo de la configuración final) pertenecientes a varias uniones.

La implementación de este paso, por lo tanto, consistirá sencillamente en generar una estación por cada puesto en la secuencia de montaje. Se genera dicho elemento tanto a nivel de datos, creando objetos de clase Station relacionados de forma adecuada, como a nivel de representación en el entorno, creando actividades genéricas dentro de la estructura de procesos del documento CATProcess que representa la línea de montaje.

Así, el algoritmo resultante se puede considerar simple, se realiza un repaso de todas las uniones siguiendo el orden de la secuencia análogo al del paso anterior, se tiene en cuenta cada unión y todas las que se han establecido como simultáneas, y si estas últimas se retiran de la cola del repaso. En cada repetición se genera una estación, con el nombre y el número de la unión si no tiene otras simultáneas (por ejemplo "WS7_Joint_7") o un nombre que identifica que es un grupo de uniones simultáneas (como "WS_SimultaneousJointGroup2").

Además, a cada estación se le deben asociar los componentes o sub montajes que se ensamblarán durante su ejecución, que en el entorno se conocen como Items. Esta asociación es sencilla a nivel conceptual, pero su implementación en el entorno CATIA V5 ha resultado compleja. Los Items son los hijos directos del sub montaje auxiliar que está asociado a cada puesto de la secuencia, por lo que estarán contenidos dentro de la estructura del producto creado como As Prepared en el paso anterior. Sin embargo, no se debe asociar los miembros de ese producto, sino nuevas instancias de los mismos, como se explica en la sección 7.4.1.3.4 (en la línea debe haber, en cada instante, distintas unidades en producción, cada una con sub montajes y componentes de las unidades de puestos anteriores de la línea).

Para lograr esto, lo más obvio sería cargar en el documento nuevas instancias de los sub montajes auxiliares asociados a los puestos de la secuencia. Sin embargo, el sistema CATIA V5 presenta un defecto en este punto: si se ejecuta el comando de cargar un determinado archivo, con una ruta y un nombre, pero en la misma sesión se abrió anteriormente otro archivo con el mismo nombre, aunque tenga una ruta diferente e incluso ya se haya cerrado, el sistema abre este archivo anterior en lugar del que se le ha especificado. Esto representaba un problema porque el nombre de muchos sub montajes de la estructura As Prepared coincide con los de otros de la estructura As Planned, y los archivos asociados se guardan por defecto con dichos nombres; además si la etapa se repite para otra alternativa en la misma sesión, también se obtendrían los archivos incorrectos.

Una solución sería renombrar de forma automática todos los archivos que se guardan por defecto, por ejemplo con un código basado en la fecha y la hora. Sin embargo eso es trabajoso pues obliga a detectar cada proceso de guardado incluido en el guardado de un documento de tipo CATProduct, que puede contener un número indefinido de submontajes que se deban guardar.

Finalmente, se optó por algo más sencillo. El propio sistema ya incluye enlaces a todos los documentos que están abiertos únicamente por estar sus elementos asociados a otro documento. Por ejemplo, si un documento de tipo CATProcess tiene un producto asociado en la sección correspondiente del árbol PPR, todos los documentos relativos a sus sub montajes, que se consideran a su vez productos, se encuentran por defecto abiertos en la sesión, y el sistema incluye sus enlaces aunque no son accesibles desde la programación. Sin embargo, sí se puede interactuar con dichos productos hijos como si se hubieran abierto sus documentos asociados. De esa forma, se ha programado que, para cada nueva estación, se identifique su sub montaje asociado dentro del producto con la estructura As Prepared, y se incluya en el árbol PPR como si fuera un nuevo producto; serán sus hijos los que se asocien a la actividad que representa la estación. Esta solución permite obtener los resultados deseados sin tener que ejecutar específicamente la orden de cargar archivos.

La ejecución de este proceso se permite únicamente si ya se ha generado el producto con la estructura As Prepared parcial, es decir, si se ha pulsado “Apply”. Para ello, era imprescindible haber ejecutado el comando “Set Sequence”. Una vez se ha realizado la acción de aplicar y generado el producto adecuado, los botones “Set Sequence” y “Apply” dejan de estar disponibles y empieza a estarlo el botón “Create”, que conduce a la ejecución de la funcionalidad descrita.

7.4.1.4.5 Deshacer la secuencia establecida

Otra funcionalidad que se ha incluido cubre la posibilidad de borrar una determinada secuencia establecida (es decir, el orden de las uniones y los sub montajes, auxiliares o no, asociados a cada una). La ejecución de este proceso supone un reinicio de la etapa. Para su implementación, se programó que se debían borrar todos los objetos creados y ejecutar de nuevo los primeros pasos de la etapa: identificar las uniones implicadas y mostrar la información de las mismas en la interfaz.

7.4.1.5 Interfaz

Todas las funcionalidades descritas anteriormente conforman el conjunto de acciones que se definió para esta etapa en el momento de su diseño. Ha sido necesario diseñar una interfaz que permita al usuario realizar tales acciones, y le proporcione la información adecuada sobre los resultados de las mismas. La Figura 65 contiene una imagen de dicha interfaz junto con la explicación del papel de cada elemento de la misma, asociados ambos mediante un código de colores.

Children List

La lista muestra los componentes y sub montajes provenientes de la vista As Planned involucrados en los procesos de montaje de la línea.

Apply

El botón llama al proceso para la creación de un producto con la estructura de la vista As Prepared determinada por la secuencia de montaje definida. El botón no está habilitado hasta que se ejecuta "Set Sequence". Habilita el botón "Create".

Create

El botón llama al proceso para la creación del conjunto de estaciones por defecto asociado a la secuencia definida, con una estación para cada puesto de la misma. El botón no está habilitado hasta que se ejecuta "Apply".

Cancel

El botón hace que la interfaz se oculte, y se permita de nuevo la interacción con el entorno. La información definida se mantiene.

Close

El botón hace que se cierre la interfaz, de forma que se borra toda la información asociada a la misma. Si no se ha ejecutado el comando "Create" previamente, no se considera superada la etapa.

Joints Execution Sequence Frame

Información y comandos relativos a la definición de la secuencia de montaje.

Sequence List

La lista muestra las uniones implicadas en la línea, en el orden de la secuencia de montaje tal y como está definida en ese momento. No se muestra información acerca de la simultaneidad.

Simultaneous List

La lista muestra las uniones establecidas como simultáneas de la unión seleccionada en la Sequence List.

Up/Down

Los dos botones ejecutan los comandos para desplazar una unión a un puesto anterior o posterior respectivamente.

Simult/Delete Simult

El botón "Simult." establece la unión seleccionada de la Sequence List como simultánea de la anterior en la secuencia. "Delete Simult" elimina dicha relación, si es que existe, con la unión anterior y sus simultáneas.

Joint Information

Se muestra la información relativa a los 2 componentes de cada unión, o bien los posibles sub montajes asociados, si se ha ejecutado "Set Sequence".

Set Sequence

El botón ejecuta el proceso para determinar los sub montajes asociados a las uniones, según la secuencia definida en ese momento. Habilita el botón "Apply".

Undo

Deshace la secuencia establecida, retornando la información de la etapa al estado inicial.

Figura 65: interfaz para la primera etapa del Bloque B

Figura 66: interfaz diseñada para la etapa 2 del bloque con su correspondencia con la estructura de procesos que genera y cuadro de diálogo para la gestión de actividades reiterativas.

7.4.2 Etapa 2: Definición de las estaciones de las líneas de montaje

En este apartado se describe la Etapa 2 del Bloque B. Se ha diseñado para que cubra la definición de la estructura de procesos de la línea de montaje asociada al nodo industrial. Se obtendrá la configuración definitiva de la misma, en cuanto a las operaciones que incluirá y su tipo, si bien la variante de alguna de las mismas puede permanecer indefinida hasta la siguiente etapa, de forma que en la misma se pueda especificar con más información para la toma de decisiones.

La definición definitiva de la estructura de procesos de la línea se realiza mediante la modificación, por parte del usuario, de una configuración obtenida por defecto, que se obtiene de las estaciones generadas al final de la etapa anterior, con las operaciones que tendrían que incluir según el tipo de las uniones que incluían. El usuario puede modificar esta configuración por defecto, y se le proporciona información acerca de los cambios efectuados en términos de tiempos del proceso. La Figura 66 muestra la interfaz creada para esta etapa, unida al cuadro de diálogo mostrado en la generación de la línea preliminar, al inicio, y al proceso resultado que se busca para la etapa: la línea definida en cuanto a sus operaciones y relaciones entre ellas.

El objetivo es la obtención de un plan de procesos de la línea de montaje que se está definiendo en el bloque. Se debe precisar que por plan de procesos se entiende una lista con las estaciones que componen la línea, junto con las operaciones incluidas en ellas, todas asociadas entre sí mediante relaciones de precedencia.

A lo largo del apartado se hablará tanto de plan como de estructura de procesos. Ambas expresiones aluden al mismo concepto, si bien la segunda se centra más en su carácter jerárquico, con actividades padre e hija. El sistema utiliza un patrón en que la línea definitiva está compuesta por estaciones que contienen un conjunto de operaciones, que pueden ser compuestas, si comprenden otras operaciones hijas, o simples, en caso contrario. El número de niveles dentro de la estructura no está restringido.

Se describirán las entradas y salidas esperadas de la etapa, las funcionalidades que incluye, la manera en que se programaron y una descripción de la interfaz desarrollada para su soporte.

7.4.2.1 Entradas y requisitos

En principio, los requisitos para el inicio de la etapa se deberían cumplir en todos los casos puesto que, como se comentaba al inicio de la sección 7.4, la metodología se ha diseñado de forma que, en la definición de la línea de montaje, no esté disponible la posibilidad de comenzar una etapa si no se ha completado la anterior de forma adecuada (excepto para la primera etapa del proceso, claro). Es decir, para poder ejecutar esta segunda etapa, se habrá debido de culminar la anterior de forma adecuada, de manera que se cambie de manera automática la propiedad que recoge el estado de definición de la línea de montaje, llamada "Definition State", a uno que lo permita: de "Joints_Sequenced" en adelante. Por ello, no será posible que se dé un error por empezar la etapa sin los requisitos adecuados.

La única entrada de esta etapa sería una secuencia de montaje adecuadamente definida. Según se entiende en la metodología, dicha secuencia debe contener todas las uniones implicadas en el nodo industrial, y en cada uno de sus puestos puede haber la ejecución de una única unión o la de varias definidas como simultáneas. La metodología modeliza dicha secuencia de montaje mediante objetos de clase Station, uno por cada puesto, que se podría considerar que representan las estaciones preliminares de la línea, y están relacionados con las uniones correspondientes, representadas como objetos Joint, tal y como se muestra en el extracto del meta modelo de la Figura 69.

Por lo tanto el requisito necesario y suficiente para poder iniciar esta etapa es que se haya ejecutado de manera completa la etapa anterior en el nodo industrial. Es posible tanto completar la etapa 1 y continuar con esta segunda en la misma sesión como terminar la primera, guardar el documento y cerrar la sesión de CATIA V5, y posteriormente lanzar de nuevo el programa y continuar con la segunda etapa. En ambos casos debe existir la información adecuada y en el formato correcto, relativa a la secuencia de montaje definida. Ello supone una dificultad de cierta consideración.

Dado que se requiere un conjunto de información relativa a la secuencia de montaje, que se obtiene tras ejecutar la etapa 1 del bloque y se almacena mediante objetos de clase Joint y Station, si se cierra la sesión, dicha información se perderá, por lo que es necesaria una manera de almacenarla de forma permanente tras finalizar la etapa anterior. De nuevo, se emplean como medio de almacenamiento de información las propiedades de los distintos elementos definidos en el entorno de representación, en este caso las actividades que representan las estaciones.

Figura 67: estaciones preliminares tras completar la etapa 1 del Bloque B, con atributos y productos de la primera.

Figura 68: estructura de procesos de una línea de montaje tras ejecutar la Etapa 2 del Bloque B.

Las uniones que se ejecutan en cada estación, se almacenan como una propiedad de tipo String (o texto), con las identificaciones de las uniones separadas por “;”. Los productos asociados a la estación, definidos por las uniones que incluye, se vincularon ya a las actividades del árbol PPR en uno de los pasos de la etapa anterior. La Figura 67 muestra una de las actividades que representa una estación, con sus productos asociados (preseleccionados, destacados en naranja) y el atributo que recoge las uniones que incluye (recuadrado en naranja).

7.4.2.2 Salidas de la etapa

La principal salida de la etapa será el conjunto definitivo de las estaciones de la línea de montaje, con la estructura adecuada de operaciones hijas, simples o compuestas (con hijas a su vez). Se trata de la estructura de procesos final de la línea.

Sin embargo, en realidad la estructura de procesos puede no estar totalmente definida. Es posible que se hayan incluido varias actividades que no tengan una variante definida en su actividad compuesta padre. Se trataría de actividades simples cuyo tipo presenta diversas variantes; normalmente para cada actividad compuesta padre, en el PRD se especifica el tipo y variante de sus hijas, pero en ocasiones, la variante se deja abierta, de forma que el usuario pueda elegir la que juzgue más adecuada en etapas en las que sea posible evaluar las distintas posibilidades.

Al comienzo de esta etapa, se pregunta al usuario si desea definir las actividades sin una variante especificada, o prefiere mantenerlas abiertas de cara a definir las en la tercera etapa, en la que se puede valorar el coste y tiempo de cada actividad en función de su variante y recursos concretos seleccionados. En caso de que el usuario decida definir las actividades abiertas, se muestran las posibles variantes y el usuario puede seleccionar una, y también elegir la opción de que se repita dicha elección para todas las actividades de ese tipo. Sin embargo, la metodología recomienda elegir que las actividades se mantengan abiertas. Este proceso se detalla en la sección 7.4.2.3.1.

Además de contar con las operaciones del tipo adecuado, según los tipos de las uniones que se realizan en su interior, tras la aplicación de la etapa cada estación debe presentar unas relaciones de precedencia para sus actividades hijas, acordes con el valor de la propiedad “Priority” de cada una. La Figura 68 muestra, mediante la visualización del diagrama de PERT que facilita el entorno, la estructura de procesos de una línea con 4 estaciones, la primera de ellas se ha desplegado, así como una de sus operaciones compuestas, denominada “Assemble”. Las otras 3 estaciones se encuentran dispuestas a continuación.

En realidad estas precedencias no se corresponden con un ciclo de operación real de la línea, puesto que en realidad se comienzan a ejecutar simultáneamente todas las estaciones de la línea, cada una con una unidad de producto en un grado de montaje diferente. Ese ajuste se realizará en la Etapa 3 del Bloque B: se definirá el diagrama de Gantt de un ciclo con un inicio simultáneo de todas las estaciones de la línea. En esta etapa se definen las precedencias de esta otra forma para dejar grabado el camino que debe seguir una misma unidad de producto durante su montaje.

7.4.2.3 Funcionalidades

Esta segunda etapa del Bloque B se ha diseñado atendiendo a un conjunto de funcionalidades que se deseaba que cubriera. Para definir las se empleó como guía los resultados que se buscaba obtener y el punto de partida. Es decir, generar la configuración, en cuanto a procesos, definitiva de la línea de montaje del nodo industrial y crear su representación en el entorno con todas las especificaciones (propiedades y enlaces), partiendo de un número de estaciones preliminares obtenido de la etapa anterior.

7.4.2.3.1 Generación de una estructura de procesos por defecto

El objetivo principal de la etapa es la elaboración de una estructura de procesos para una determinada línea de montaje, y tras su ejecución se espera obtener el conjunto de estaciones finales de la misma, cada una con las operaciones hijas, simples y compuestas, adecuadas.

Este proceso puede resultar laborioso si se efectúa de forma manual, pues requiere la generación de un elevado número de actividades. La metodología plantea la generación automática de una estructura de procesos por defecto y, a partir de ahí, que el usuario introduzca los cambios que juzgue oportunos para la mejora del proceso.

La introducción de dichos cambios se asistirá mediante la automatización de las acciones necesarias (como regenerar relaciones de precedencia cuando se elimina o reposiciona una actividad) y proporcionando información acerca de las repercusiones de los cambios. Se detallará más la modificación de un proceso dado en esta etapa en las secciones 7.4.2.3.2 a 0.

Para la creación automática de la estructura de procesos inicial, se emplea la información contenida en la sección de actividades del diccionario PRD. Ello representa una librería de actividades, en la cual todos los tipos existentes en cada caso de montaje deben estar adecuadamente definidos. Se parte de la información obtenida al completar la etapa anterior, en la que se definía la secuencia de ejecución de las uniones incluidas en la línea de montaje.

	INVOLVED OPERATIONS	IS SEP.	P.	OPERATION TYPE	SUBJECT	VARIANT	ATT. s		
							Name	Type	Unit
Joint Fuselage-fuselage	Load and Position P1	No	1	Positioning at jig	Heaviest	Base component	Cost	Real	€
	Load and Position P2	No	1	Positioning at jig	Not Heaviest	Added component	Uc	Real	€
	Check interfaces and alignment	No	2	Testing		Structure alignment	Time	Real	s
	Nest	No	3	Nesting	Not Heaviest	-	Uncertainty in time	Real	s
	Assemble	No	4	Mechanical joint execution		Metal-metal	Subject	String	
	Check continuity with masses	Yes	5	Testing	Set	Structural continuity			
	Install systems in interfaces	Yes	6	Combined system installation	Set	-			
	Install enclosures and/or closing devices	Yes	6	Addition of small components	Set	-			
	Connect installations	Yes	7	Combined system connexion	Set	-			
	Check functionalities	Yes	7	Functional tests	Set	-			
	Apply sealer at junctions	Yes	8	Sealing	Set	-			
	Retire from jigs	Yes	9	Positioning at jig	Set	Added component			

Tabla 26: definición del tipo de unión "Fuselage-fuselage" en un diccionario PRD.

Cada puesto en la secuencia de uniones generada al término de la etapa 1 del bloque está ocupado bien por una única unión, bien por un grupo de uniones que se ejecutarán de manera

simultánea. En la creación automática de la estructura de procesos el sistema considera cada uno de estos puestos en la secuencia como una estación de la línea. Las operaciones a ejecutar dentro de cada estación, por tanto, se obtienen de las uniones asociadas a ese puesto en la secuencia. En el diccionario PRD los tipos de unión están definidos como si se tratase de tipos de actividades compuestas. La Tabla 26 contiene, a modo de ejemplo, un extracto del diccionario PRD definido para los casos de estudio realizados, que se detallan en el 0.

La información que define cada tipo de unión, y de operación compuesta en realidad, incluye el conjunto de operaciones hijas que comprende, y algunas propiedades de cada una de ellas como miembros de la entidad padre. Como se observa en la Tabla 26, para cada actividad hija se incluye su nombre (campo “Involved Operations”), su tipo y variante (“Operation type” y “Variant”) e información acerca de su comportamiento dentro del objeto padre, como su propiedad Priority, que define las precedencias entre todas las hijas (campo “P.”) y su propiedad IsSeparable, que determina si se pueden ejecutar en la estación siguiente (campo “Is sep.”)

Un campo importante en la definición de las actividades compuestas, especialmente las uniones, es “Subject”. En él se especifica la manera de determinar sobre cuál de los productos asociados a la actividad padre se aplican las acciones de cada una de las hijas. Por ejemplo, para la primera operación de la unión de la Tabla 26, Load and Position P1, el campo “Subject” vale “Heaviest”, lo que implica que se le asociará el producto con mayor peso de entre todos los asignados a la actividad padre (la unión “Fuselage-fuselage”, en este caso).

La manera en que el sistema genera el plan de procesos por defecto consiste en ir repasando todos los puestos de la secuencia obtenida de la etapa anterior, a los que considera las estaciones de manera preliminar. Para cada puesto se genera una estación y se le asocian como operaciones todas las actividades hijas de las uniones incluidas en él. La creación de actividades se realiza empleando una función del objeto ActivityType correspondiente, que devuelve un nuevo objeto de clase ActivityObject, con las propiedades de una actividad del tipo representado por aquél.

Figura 69: extracto del modelo UML referido a la parte de procesos.

La forma de determinar la precedencia entre las operaciones de las estaciones que el sistema genera por defecto viene dada por el campo Priority de cada una, que se mantiene dentro de la estación. En otras palabras, se considera que las actividades hijas de distintas uniones asociadas a la estación, pero con mismo valor de Priority se iniciarán en paralelo, tras finalizar las que tuvieran valores menores.

Se obtiene, por tanto, un grupo de objetos de clase Station, cada uno asociado a los correspondientes objetos de clase ActivityObject. La Figura 69 muestra la parte del meta modelo referida a actividades, uniones y estaciones. Como se puede observar, los objetos de clase Station se relacionan con las operaciones de la estación que representa mediante un objeto llamado StationProcess, de clase ActivityObject. Dicho objeto representaría el conjunto de procesos a ejecutar en dicha estación, que estarán asociados como actividades hijas o hijas de éstas.

Dentro de un mismo nivel, las actividades hijas no se encuentran relacionadas según las restricciones de precedencia, esa información está almacenada en el campo Priority. Las actividades dentro de un mismo nivel se encuentran asociadas entre sí mediante sus campos "Previous" y "Next", formando una secuencia lineal. Este orden respeta la propiedad Priority pero sin un auténtico enlace que represente la precedencia. Es decir, dos actividades con mismo nivel de prioridad podrán ocupar puestos consecutivos aunque representarían operaciones que se podrían iniciar en paralelo.

Cuando ya se han creado los objetos correspondientes a estaciones y operaciones, se realiza un repaso de los mismos con varios objetivos. En primer lugar, se busca actividades que no estén definidas del todo, debido a que no presentan una variante concreta, sino que su actividad padre está definida en el PRD de manera que dejaba su variante abierta. En esos casos, la metodología recomienda mantener dichas actividades abiertas hasta alcanzar la Etapa 3, donde se puede elegir una variante con información acerca de sus implicaciones sobre los costes, tiempos y recursos necesarios.

Figura 70: definición rápida de variantes en los pasos de inicialización de la etapa 2 del Bloque B.

Sin embargo, también se ha incluido la posibilidad de que el usuario elija ya una variante concreta en este punto. La Figura 70 muestra el proceso de toma de decisiones: primero, se pregunta si se desea que todas las actividades sin variante definida permanezcan abiertas. En caso de que se elija la respuesta afirmativa, se presentan las distintas posibilidades para cada actividad y, tras elegir una, se pregunta si se desea establecer una regla de actuación para todas las actividades simples dentro de la misma actividad padre. Las opciones para establecer dicha norma son elegir siempre la opción de mantener abierta la actividad; elegir la opción elegida en la última decisión cuando sea posible; elegir dicha opción sólo para ese tipo de actividad o nunca seguir un protocolo (no preguntar más para esa actividad padre).

El segundo objetivo es detectar actividades reiterativas y eliminarlas. Se entiende por reiterativas aquellas operaciones que, dentro de una misma actividad padre, son del mismo tipo, tienen el mismo nombre y el mismo sujeto (campo Subject). La repetición de actividades en una misma estación se produce debido a que muchas uniones implican operaciones del mismo tipo con uno de sus productos asociados. Si esas uniones se ejecutan en una misma estación, posiblemente el producto asociado sea el mismo para varias de las actividades análogas provenientes de uniones distintas.

Por ejemplo, si se realizan en la misma estación dos uniones que comparten uno de los productos asociados, P, las operaciones como “Posicionar P” aparecerán dos veces en la estación, y únicamente se deberían ejecutar una. Al iniciarse la etapa, se le pregunta al usuario si las actividades reiterativas deben ser todas eliminadas, si se debe preguntar en cada caso o si no se debe realizar ninguna acción. En la Figura 70 se muestra también el mensaje a este respecto junto con las distintas opciones que se plantean: eliminar las actividades reiterativas siempre, nunca o preguntar en cada caso. En la Figura 66 se muestra asimismo, como paso previo a la carga de la interfaz de la etapa, dicho cuadro de diálogo.

Todo lo anterior se apoya, como se puede concluir, en la manera en que está definido el modelo del sistema, donde son las uniones los objetos que relacionan la manera en que se ensambla un producto con el plan de procesos concreto de su línea de montaje.

7.4.2.3.2 Creación de nuevas estaciones

Tras la generación de una configuración inicial de la línea de montaje, con las operaciones que deberían incluir las estaciones que se generaron por defecto en pasos previos, el usuario tiene la oportunidad de realizar modificaciones. Posiblemente, el tipo de modificación más importante sea la creación de nuevas estaciones dentro de la línea. Ello tiene un impacto directo sobre el tiempo de ciclo que impondría la línea de montaje. Si, por ejemplo, una de las estaciones tiene una duración mucho mayor que las demás de la línea, dicho tiempo de ciclo tendrá ese valor. Si se crea una nueva estación en la que se realice parte de las operaciones asociadas a la estación anterior, su duración disminuirá y también el tiempo de ciclo.

Para crear una nueva estación, se debe especificar detrás de cuál de las existentes se incluirá y, de manera opcional, el nombre de la misma. Después, es necesario incluir las operaciones que se realizarán en ella. Para que una operación se pueda cambiar de una estación a otra, debe tener un valor de “Yes” para su propiedad IsSeparable. Este proceso se explica con más detalle en la sección 7.4.2.3.3, que trata expresamente de ello.

No obstante, la creación de nuevas estaciones puede no ser adecuada en ciertos casos, dado que una nueva estación supone emplear recursos adicionales en la planta. Si el tiempo de ciclo de todo el proceso se corresponde con la duración de una estación perteneciente a la línea de montaje de otro nodo industrial, la adición de estaciones adicionales a la línea que se está definiendo no tendrá repercusiones sobre él. Sin embargo sí que se incrementaría la eficiencia en la utilización de recursos, puesto que, para las estaciones de duración menor de la misma línea habría menos tiempo de diferencia, en el cual sus recursos están inactivos.

Para que el usuario disponga de información con la que decidir si es adecuado crear una nueva estación, y qué actividades de las otras debe incluir, el sistema realiza una evaluación de la duración de la estación que se seleccionen, del tiempo de ciclo que impondría la línea y muestra además el tiempo de ciclo de todo el proceso de montaje, tal y como está definido en ese momento. De esa forma, el usuario puede valorar las opciones, así como conocer el impacto de los cambios.

La evaluación de los tiempos en este punto no tiene mucha precisión, debido a que se realiza empleando los distintos tiempos de referencia medidos para las actividades simples en condiciones estándar; no se tiene en cuenta que los recursos asignados puedan ser más rápidos o lentos, ni que puede que en ciertas estaciones se establezcan turnos extraordinarios. Sin embargo, sí que sirve como una guía para que el usuario pueda valorar la conveniencia de cada posible acción.

7.4.2.3.3 Desplazamiento de operaciones

Una de las funcionalidades que incluye la etapa es la acción de desplazar una operación de una estación a otra. Ello es muy útil para la definición de nuevas estaciones de la línea, pero también se puede realizar sin que se haya creado ninguna. Sencillamente, se trata de mover las operaciones de una estación a la anterior o a la siguiente. Se permite, para el primer prototipo de implementación, únicamente a las operaciones que son hijas directas de la estación; aunque, según la metodología, otras actividades también podrían ser desplazadas.

El requisito para que una actividad se pueda desplazar de una estación a otra es que su propiedad *IsSeparable* tenga un valor de “Yes”. En principio, el sistema soporta la posibilidad de que las primeras operaciones de una estación se desplacen hasta la anterior, si cumplen dicho requisito. Sin embargo, las operaciones iniciales asociadas a los procesos de unión relacionados con productos del sector aeronáutico suelen corresponder con el posicionamiento de los componentes adecuados en los utillajes de la estación, por lo que a menudo no tendrá sentido desplazar dichas operaciones a la estación anterior.

En el diccionario PRD empleado en la ejecución de los casos prácticos de la metodología las primeras operaciones de los procesos de unión tienen una propiedad *IsSeparable* de valor “No”, lo que no permite dicha posibilidad. El desplazamiento de operaciones a la estación anterior puede tener sentido si se trata de operaciones no relacionadas con el posicionamiento de componentes y que se deben ejecutar sobre productos que ya están asignados a dicha estación.

Al desplazar una operación de una estación a otra se impone respetar las restricciones de precedencia. Es decir, si una operación se desplaza de una estación a la siguiente, es necesario que las actividades de la primera que se deban ejecutar después de la actividad desplazada también se desplacen. Esto se ha denominado arrastre de las actividades. El sistema lo pregunta, de forma que el usuario puede continuar con el desplazamiento o cancelar la acción. La Figura 71 muestra el cuadro de diálogo donde se pide al usuario confirmación

El arrastre de actividades al desplazar otra a una estación diferente plantea cierta problemática. Se trata de determinar qué operaciones se deben arrastrar. Es evidente que todas las operaciones que se arrastren a la siguiente estación deben tener una prioridad de valor mayor que la de la actividad desplazada (o, análogamente, una prioridad menor si se trata de un desplazamiento a la estación anterior). Sin embargo, no todas las operaciones que cumplen dicho requisito se deben arrastrar: es una condición necesaria pero no suficiente. En realidad, se deben arrastrar a aquellas operaciones que provengan de la misma unión que la operación desplazada. Por ello, los objetos de tipo *ActivityObject* tienen una propiedad *IsPartOfJoint* donde se almacena el nombre de la unión de la que provienen, puesto que en una misma estación es muy posible que haya operaciones provenientes de distintas uniones.

Al desplazar una operación, así como todas las operaciones que deban ser arrastradas, a una estación diferente, se debe modificar su valor de prioridad. Así, si una operación con prioridad P se desplaza a la siguiente estación, su prioridad cambiará a 1, y todas las operaciones arrastradas tendrán un nuevo valor de prioridad, restando $P-1$ a su valor anterior. Si se trata de un desplazamiento a la estación anterior, el procedimiento es análogo, aunque en ese caso no se tiene en cuenta las dos últimas actividades de dicha estación, que son *Retirar del utillaje* y *Mover a la siguiente estación*. En ese caso se deberían arrastrar todas las operaciones de prioridad menor que la desplazada. Las operaciones de prioridad 1 arrastradas pasarían a tener un valor coincidente con el mayor de la estación (excluyendo las 2 últimas actividades) más 1; $M+1$, y el resto sumarían M a su valor anterior.

Al realizar cualquier operación de desplazamiento, se recalcula de forma automática el tiempo de duración de las estaciones y el tiempo de ciclo que impondría la línea, es decir, el máximo de sus estaciones. Si dicho valor es mayor que el tiempo de ciclo del proceso completo, se considera que ése será el nuevo valor de dicho parámetro.

Al crear nuevas estaciones, es posible que la secuencia de montaje que se definió anteriormente no se pueda determinar, por lo que también se incluye como propiedad de texto dentro del entorno de representación. Esta vez se le asigna al nodo principal de la estructura de procesos: se denomina "Joint Stations sequence" y su valor será una cadena en la que los puestos de la secuencia se separarán mediante los caracteres "->", mientras que las uniones simultáneas en un mismo puesto se separarán mediante ";" y se encontrarán entre paréntesis tras el nombre de la estación.

7.4.2.3.4 Eliminación de actividades y estaciones

Se ha incluido la posibilidad de eliminar alguna de las actividades de una determinada estación. Simplemente se elimina el objeto correspondiente de entre los que representan a las operaciones de la estación. Al hacerlo, de forma automática se regeneran los enlaces de tipo Next y Previous de las actividades inmediatas a la eliminada. Los valores de precedencia no se modifican.

No se ha impuesto ninguna restricción para la eliminación de actividades por parte del usuario. Es éste quien debe juzgar la conveniencia de la acción en base a su criterio. En cuanto a la eliminación de actividades, únicamente se permite para las que han sido creadas en esta etapa, las que se crearon por defecto al término de la Etapa 1 no se pueden eliminar.

Figura 71: cuadro de diálogo para el arrastre de las operaciones posteriores a una que se ha desplazado de estación.

7.4.2.3.5 Creación de nuevas actividades

La metodología también incluye una funcionalidad para la creación de nuevas actividades dentro de una estación. Se debe especificar la actividad tras la que se posicionará la nueva operación, además de su tipo y variante.

Al igual que para la funcionalidad anterior, se produce un reajuste de los enlaces entre los objetos que representan a las distintas actividades. Además, en este caso sí se debe reevaluar la prioridad de todas las operaciones de la estación que tengan una mayor que la de la nueva actividad. Se considera que la nueva actividad tendrá como precedente aquélla que se seleccionó como actividad anterior, y a su vez la nueva será precedente de todas las que tengan mayor valor de prioridad y provengan del mismo proceso de unión. A estas últimas se les incrementará el valor de prioridad en 1.

7.4.2.3.6 Estimación de parámetros

Otra funcionalidad que se ha debido incluir en esta etapa es el cálculo de algunos parámetros del proceso de montaje. Para el cálculo de valores de costes y tiempos de actividades y estaciones, se ha desarrollado una serie de funciones que se llaman unas a otras, de forma que se calculan todos los parámetros necesarios para calcular otro parámetro. Dichas funciones se emplean de manera reiterada durante la ejecución de la Etapa 3, por lo que su explicación se ha incluido en la sección que detalla dicha etapa, la 7.4.3.4.1.

En esta etapa, únicamente es posible la estimación de tiempos. El valor calculado de los mismos no se debe tomar como una estimación acertada, puesto que todo se da en un estado de definición de la línea en el que no se conocen muchos aspectos que tienen influencia sobre los parámetros a evaluar.

7.4.2.3.7 Generación de la estructura de procesos final en el iDMU

La última funcionalidad de la etapa se ejecuta al pulsar el comando “Apply”. Se trata de generar en el entorno CATIA V5 la representación de las estaciones definidas en la etapa mediante objetos de la clase ActivityObject, relacionados entre sí según la estructura de procesos definitiva. Se debe tener en cuenta que la información que realmente se almacena de una sesión a otra y, de hecho, parte de los resultados que se busca obtener están relacionados con la representación digital del proceso de montaje en dicho entorno. La representación del proceso de montaje conceptual sirve para almacenar toda la información asociada y como punto de partida para desarrollar las distintas partes del proceso con mayor detalle.

Se busca obtener, por tanto, una estructura de procesos definida en la sección correspondiente del árbol PPR del documento CATProcess que representa la línea de montaje que se está definiendo. Eso incluye el conjunto de estaciones definitivo, cada una con sus respectivas operaciones con las restricciones de precedencia; los productos de entrada de cada estación y el producto final saliente de la línea y la asignación de dichos productos a las estaciones y operaciones adecuadas.

La Figura 72 muestra un ejemplo del tipo de estructura que se espera obtener de la etapa. En la zona superior izquierda se muestra la lista de operaciones de una estación, en el árbol del documento que representa la línea. En la zona derecha se muestra el mismo árbol, con algunas operaciones desplegadas. Se observa que las distintas operaciones de cada estación tendrán asignados uno o varios de los productos asignados a aquélla. Para la primera operación de la lista, se ha desplegado también la lista de atributos, que incluye su tipo y variante (definido con el formato *nombre tipo/nombre variante*), su identificación, el nombre de la unión de la que proviene y el nombre de su “Subject” o producto sobre el que se realiza.

Figura 72: estructura de procesos de una estación generada en la Etapa 2 del Bloque B.

En la parte inferior de la Figura 72 se ha incluido el diagrama de PERT de los procesos de la estación, con algunas actividades compuestas desplegadas. Se puede observar que todas las actividades están enlazadas entre sí. Estos enlaces se han determinado mediante la propiedad Priority de las distintas operaciones. Como se puede observar, existen diversas ramas de actividades enlazadas. Ello se debe a que la estación incluye las operaciones pertenecientes a varias uniones del producto. Las restricciones de precedencia se imponen entre actividades que provienen de la misma unión.

7.4.2.4 Programación

Para la utilización de las funcionalidades que se definieron al diseñar la etapa, descritas anteriormente, es necesario programar los comandos correspondientes. En este apartado se describe la forma en que se programó la ejecución de las principales funcionalidades de la etapa.

7.4.2.4.1 Generación de una estructura de procesos por defecto

Quizá una de las funcionalidades más importantes de la etapa sea la creación automática de una estructura de procesos por defecto, basada en la información obtenida en la anterior etapa del bloque. La propia etapa incluye utilidades para asistir en la elaboración de dicha estructura, como creación de nuevas estaciones o modificación de las existentes, pero todo ello parte de un plan de procesos inicial, generado al arrancar la etapa.

Se puede considerar que la estructura preliminar generada por defecto es la base para la aplicación de toda la etapa, más aún teniendo en cuenta que es posible el término de la misma manteniendo el plan inicial, sin realizar ninguna modificación. De otro modo, el usuario se vería obligado a definir de forma interactiva todas las estaciones de la línea, y se ha considerado más provechoso facilitar que se trabaje sobre una idea ya existente.

En la Figura 73 se muestra el diagrama de flujo que sigue el sistema para la generación de la estructura de procesos inicial. En un primer paso se realiza un análisis de los procesos del documento que incluye la representación digital, o iDMU, de la línea de montaje. Los procesos existentes en ese momento en el documento provendrán de la etapa anterior, y serán un número de actividades que representarán los distintos puestos de la secuencia de uniones. Cada uno de dichos puestos será una estación de la estructura inicial. La unión o uniones simultáneas asignadas a cada puesto aparecerán como una propiedad de la actividad que lo represente en el documento. Por cada uno de los puestos se crea un objeto de clase Station, pues se consideran las estaciones de la estructura preliminar.

Figura 73: diagrama de flujo de la creación de una estructura de procesos por defecto.

Tras pedir al usuario que defina una forma de actuar ante actividades reiterativas (eliminarlas, preguntar o mantenerlas), se procede a la generación de los objetos que representen la estructura de procesos por defecto. Para cada estación se identifican las uniones simultáneas que incluye y, según su tipo, se crean las actividades que incluye y éstas se asignan como operaciones de la estación. Cada actividad se asigna a la estación (o a su actividad padre) respetando su campo Priority, es decir, se asignará como la actividad “Next” de otra actividad con mismo nivel de prioridad o, si no la hay, se asignará como “Next” de la última con el nivel de prioridad inmediatamente menor.

La creación de actividades se realiza mediante una función denominada “NewActivity”, que pertenece a la clase ActivityType, y sigue el diagrama mostrado en la Figura 74. Cada objeto de dicha clase representa un tipo concreto de actividad y, al ejecutar la función “desde él”, ésta devuelve un objeto de clase ActivityObject, que representa una actividad de dicho tipo. Por ejemplo, sea el objeto drillingType de la clase ActivityType, si se ejecuta la llamada **drillingType.NewActivity (“exampleName”)**, la función devolverá un objeto de clase ActivityObject, del tipo representado por drillingType, y llamada exampleName. Además tendrá los atributos e hijos correspondientes a dicho tipo de actividad.

Precisamente, la existencia de tipos de actividades compuestas o con otras actividades hijas, hace necesario que la función NewActivity sea recursiva. Según se muestra en la Figura 74, en cada ejecución de la función, se asignan los valores de los campos Name, Type y Variant según el parámetro de entrada (iName) y según la información del objeto ActivityType desde el que se ha llamado a la función.

Figura 74: diagrama de flujo de la función recursiva para la creación de actividades

El siguiente paso es añadir todos los atributos definidos para ese tipo de actividad en el PRD. Por último se deben añadir las actividades hijas que debe incluir una actividad de ese tipo. Para ello, se recorren todas las actividades asociadas al objeto ActivityType como hijas y, para cada una, se llama a NewActivity desde su tipo (llamada a **children_c.Type.NewActivity(children_c.Name)** en la Figura 74) para crear un nuevo ActivityObject, se copian los campos así como el valor de los atributos y se añade la actividad recientemente creada como hija de la que se está creando mediante la ejecución inicial de NewActivity.

Una vez se han asignado todas las posibles operaciones a las estaciones por defecto, se realiza una asignación de los productos “Subject” de cada actividad. Se sigue la regla especificada como propiedad de cada objeto: “Heaviest” si se debe asociar el producto más pesado de los asignados a la unión; “Not heaviest” en caso contrario o “Set”, si la actividad se realiza sobre ambos objetos (se debe tener en cuenta que cada unión tiene asociados únicamente dos productos, según el modelo que sigue el sistema).

Cuando ya se han asignado todas las posibles operaciones a las estaciones preliminares, si el usuario así lo especificó en el paso anterior, se realiza un nuevo repaso para eliminar (o preguntar, en función de la respuesta del usuario al ser preguntado anteriormente) las actividades que tengan mismo y tipo, nombre y “Subject” que otras en la misma estación. En cada caso se elimina la actividad con mayor valor de su campo “Priority”, es decir, la que se ejecutaría más tarde.

Por último, se relacionan las estaciones definidas por defecto entre sí, mediante links que en este caso sí representan una precedencia, reflejando el orden que seguiría un producto al ser ensamblado en la línea. Estas relaciones, en rigor, no se seguirían en el proceso real dado que, según la hipótesis de línea síncrona, durante cada ciclo se inician simultáneamente todos los procesos de las estaciones existentes en la línea.

7.4.2.4.2 Modificación de la configuración de la línea

Las acciones que el usuario puede realizar durante la Etapa 2 del Bloque B, mediante los comandos incluidos en la interfaz, están orientadas a la definición de la configuración definitiva de la línea de montaje del nodo industrial, en cuanto a su estructura de procesos. En lugar de definición, se podría hablar de modificación, dado que se parte de una configuración por defecto, obtenida como resultado de la ejecución de la etapa anterior. Partiendo de ello, el usuario puede realizar ajustes para mejorar la línea, según la información que se le proporciona. En el momento en que se ejecutan dichas acciones se está trabajando con objetos, datos informáticos que no quedarían guardados entre sesiones. Es al ejecutar el comando “Apply” cuando se crea una representación en el entorno de dichos objetos.

Una de las modificaciones soportadas es la creación de nuevas estaciones en la línea. El usuario selecciona de la lista de la interfaz la estación tras la cual se incluiría la nueva, y especifica su nombre. Al pulsar “New after” se crea un nuevo objeto de clase Station, enlazado al que se seleccionó como predecesor y también al que era el sucesor de éste. La relación entre estos dos se elimina para mantener una secuencia lineal.

Para poder definir las nuevas estaciones, se incluye la posibilidad de pasar operaciones desde otras, principalmente con la finalidad de equilibrar el tiempo de duración de todas las estaciones de la línea y reducir así su tiempo de ciclo. Este desplazamiento se puede realizar hacia la estación inmediatamente anterior o a la posterior, e incluye el desplazamiento de todas las operaciones que estuvieran vinculadas mediante precedencia a la desplazada, anteriores o posteriores respectivamente, lo que se conoce como arrastre de las mismas.

La programación de esta acción es relativamente sencilla, se trata de mantener enlazadas todas las actividades que se van a desplazar o arrastrar, eliminar los enlaces con otras de la misma estación, eliminar sus relaciones padre-hija con la estación, incluirlas como hijas de la estación destino y modificar su prioridad, teniendo en cuenta que se desplazarán al inicio de la estación siguiente o al final de la estación anterior, según el caso.

Otra acción incluida en la etapa es la eliminación de actividades. El usuario puede de esta forma modificar la línea de montaje, aunque en este caso se confía en su criterio, pues el sistema no incluye ninguna forma de controlar que no se elimine una operación indispensable en la línea. La programación de este comando incluye la eliminación del objeto asociado a la actividad seleccionada como hija de la estación padre, y la eliminación de los enlaces con otras actividades de la misma y creación de nuevos entre ellas para mantener la secuencia. No se realiza un vaciado específico del espacio que ocupa el objeto en memoria, sino que redefinen los hijos de la estación como los que tenía anteriormente sin incluir al objeto que se desea eliminar. De forma automática se elimina el espacio que ocupaba al no haber una variable que apunte a esa dirección.

También es posible eliminar estaciones. Esta acción está limitada a las estaciones que se hayan creado en la etapa. La programación de la misma se basa en el desplazamiento de las operaciones hijas a la estación que corresponda según la unión de la que provengan (las estaciones almacenan las uniones que incluían en un principio) y la eliminación del objeto correspondiente de manera análoga a la descrita anteriormente, eliminando sus enlaces con otros productos y no incluyéndolo en redefiniciones de las listas a las que perteneciera.

En la metodología se ha previsto también la creación de nuevas actividades dentro de una estación, especificando el tipo y, de forma opcional, la variante. Sin embargo esta acción no se ha implementado en el prototipo demostrador, dado que su factibilidad está sobradamente demostrada, puesto que el sistema genera de forma automática muchas actividades de un tipo deseado, y que no se ha estimado que represente un beneficio justificado y no se considera necesaria para la ejecución de los casos de estudio proyectados.

7.4.2.4.3 Estimación de parámetros

La estimación de parámetros en esta etapa se centra exclusivamente en los tiempos. Se debe mostrar al usuario el tiempo de duración de la estación que se selecciones de la lista, así como la duración máxima de las estaciones de la línea, que representa el tiempo de ciclo que impondría éste nodo industrial al proceso, y el tiempo de ciclo según como está definido el montaje en el momento, es decir, el mayor de entre los tiempos que impondrían todos los nodos existentes.

El cálculo de parámetros del sistema a partir de las propiedades de actividades y recursos se realiza mediante un conjunto de funciones recursivas pertenecientes a las clases que representan a dichos elementos, ActivityObject y ResourceObject. En el estado de definición del proceso en el que se ejecuta esta etapa aún no se han especificado los recursos pero sí se cuenta con la información relativa a unos tiempos de duración medidos en condiciones estándar, por lo que el valor final se infiere a partir de ahí.

Para todos los cálculos se han seguido las reglas especificadas en la sección 5.5.5, que describe la modelización de tiempos y costes que se propone en la metodología. Las funciones mencionadas se han desarrollado, principalmente para la tercera etapa del Bloque B, por lo que la descripción de su programación e implementación se ha incluido en la sección 7.4.3.4.1, asociada a dicho paso de la metodología.

7.4.2.4.4 Generación de la estructura de procesos final en el iDMU

Una funcionalidad indispensable de esta segunda etapa es la generación en el entorno de representación, CATIA V5, de la estructura de procesos que se ha definido mediante objetos y sus relaciones. Las actividades de la sección de procesos del árbol PPR que se generen deben ser análogas a las que se han definido en la etapa: tendrán el mismo nombre, productos asignados y composición de sus actividades hijas; además, otros campos como su tipo, variante, identificación o la unión de la que provienen se especifican como atributos del elemento.

La estructura de procesos definida contendrá el conjunto de estaciones resultante de la etapa, con la disposición de actividades simples y compuestas que se haya determinado, relacionadas según la precedencia impuesta por los valores de la propiedad Priority y las reglas del sistema. Para generar la representación en el entorno de dicha estructura, se sigue el algoritmo mostrado en la Figura 75. Su ejecución se inicia al pulsar el botón “Apply” de la interfaz.

Para cada estación definida a nivel de objetos, se busca si ya tiene una actividad que la represente en el entorno, dado que en la etapa previa se generaron unas estaciones por defecto y una actividad en el árbol representando cada una. De no ser así, se crea una nueva actividad al mismo nivel que las que representan a las otras estaciones. A continuación, se crea la relación de precedencia con la actividad del árbol correspondiente a la anterior estación, si la actual no fuera la primera de la secuencia.

Figura 75: diagrama de flujo para creación de estaciones y sus operaciones en el entorno CATIA V5.

El siguiente paso consiste en la asignación de productos entrantes, o Items. Cada estación, a nivel objeto, tiene asociado un producto saliente. En el entorno de representación, se le asignará como Items los sub montajes y componentes hijos directos del mismo, pues serán los elementos que se deben ensamblar entre sí. Si la estación se ha creado en esta segunda etapa, no tendrá asociado ningún producto, pero las operaciones que incluya sí lo tendrán, incluido en la propiedad Subject. En esos casos se incluyen como Items todos los productos que alguna operación hijo tenga asignados. Si pertenecen a algún sub montaje que en ese punto del montaje ya se ha completado, se asignará el producto padre.

Por último se crean todas las operaciones incluidas dentro de la estación. Es te paso se efectúa ejecutando una subrutina recursiva denominada CreateActivitiesRecursively, cuyo diagrama de flujo está recogido en la Figura 76. Básicamente, el algoritmo consiste en crear definir los hijos de una actividad del entorno de representación, partiendo de la configuración de hijos definida mediante objetos ActivityObject. En la primera llamada se pasa como argumento el objeto que representa la misma estación y la actividad creada en el entorno CATIA V5. Se crean nuevas actividades hijas de ésta, a cada una se le da el nombre adecuado y se le incluyen los atributos correctos (tipo, variante, "Subject" y unión). Si una actividad hija creada tiene hijos, se vuelve a llamar a la sub rutina para definirla adecuadamente.

En un segundo bucle, se define la precedencia entre las actividades hijas. Debe hacerse en un bucle separado porque es necesario que ya se haya creado la representación de todas las operaciones o actividades hijas. Para cada una, se realiza una búsqueda en el árbol PPR de la representación de los ActivityObject precedentes del que representa, y se crea dicho enlace.

Figura 76: diagrama de flujo para la creación recursiva de actividades en el entorno a partir de una estructura de objetos de clase ActivityObject.

7.4.2.5 Interfaz

Las funcionalidades incluidas en la etapa y descritas en este apartado se cubren mediante la ejecución de las funciones y sub rutinas programadas, que se pueden ejecutar mediante los controles incluidos en la interfaz asociada a la etapa. Dicha interfaz se muestra en la Figura 77. Como se puede observar se compone, principalmente de una parte superior que incluye una lista de las estaciones de la línea y otra de las operaciones; un conjunto de botones para la modificación de la línea (creación de estaciones, desplazamiento de actividades, eliminación de las mismas, etc). Además se muestra información acerca de los tiempos asociados a la línea: duración de la estación seleccionada, duración máxima y tiempo de ciclo del proceso. En la zona inferior se incluyen botones para ocultar y cerrar la interfaz, reiniciarla y aplicar los cambios.

Station List La lista muestra las estaciones existentes en la línea en un momento dado. Permite seleccionar una.	Information Area Se muestran información acerca de tiempos.
Operation List La lista muestra las operaciones de las estaciones. Permite seleccionar una de ellas.	Cycle Time at plant La mayor duración de las estaciones, es el tiempo de ciclo que impondría la línea.
New after (stations) El botón hace que se genere una nueva estación, inmediata a la seleccionada y con el nombre especificado en Name Box.	At Station Duración de la estación seleccionada.
New after (operations) El botón hace que se genere una nueva operación, inmediata a la seleccionada y con el nombre especificado en Name Box.	Cycle Time of Assembly Process Tiempo de ciclo del proceso de montaje completo
Name Box Es la zona donde se debe definir el nombre de la nueva estación u operación.	Delete repeated Elimina las operaciones reiterativas de la estación seleccionada.
Delete station El botón elimina la estación seleccionada (si es nueva).	Unify similar Se juntan en una las op.s de una estación con mismo tipo.
Delete operation El botón elimina la operación seleccionada.	Displace Up/Down Se desplaza una operación y las que "arrastre" a la estación anterior o posterior.
Hide Se oculta la interfaz, la información se mantiene.	Recover Joints Sequence Se reinicia la etapa, se vuelve a las estaciones por defecto.
Close Se cierra la interfaz, la información se pierde.	Apply Se genera las estaciones y operaciones en el entorno de representación, según su definición.

Figura 77: interfaz desarrollada para la Etapa 2 del Bloque B.

7.4.3 Etapa 3: Gestión de recursos y operaciones

En la tercera etapa del bloque, se asigna unos recursos concretos a las operaciones definidas previamente. La estructura del proceso está totalmente determinada tras la ejecución de la etapa anterior. El número de estaciones de la línea y las operaciones simples o compuestas que engloba cada una, así como el número de ellas y la secuencia de ejecución, viene dado al comienzo de este paso. La Figura 78 muestra la interfaz y su correspondencia con la maqueta digital del proceso.

Sin embargo, ciertas operaciones sencillas que admiten más de una variante pueden quedar indefinidas hasta llegar a esta etapa, de forma que se pueda elegir la variante más conveniente atendiendo a las implicaciones que supondría para el proceso. Un ejemplo de ello son las operaciones de taladrado del modelo PRD definido, que pueden ser automáticas o manuales, de forma que para cada variante se requieren unos recursos distintos.

En la etapa se admite la selección de recursos y variantes de actividades de forma manual. El usuario puede elegir entre diversas alternativas, y para cada una de ellas puede comprobar las propiedades que tendría la actividad resultante y las variaciones estimadas que supondría para la operación padre, la estación o la línea completa. La capacidad de los recursos asignados se chequea, pues debe ser mayor que la requerida por la operación. En caso contrario se muestra un mensaje advirtiendo que se necesita añadir más recursos, o bien elegir otros con prestaciones superiores.

La selección de recursos también se puede realizar de forma automática. La etapa incluye la posibilidad de optimizar la elección de los recursos concretos para operaciones simples, operaciones complejas, estaciones o toda la línea. Esta optimización se puede realizar según el criterio de minimizar el tiempo requerido, el coste, o bien un balance de ambos. Es posible optimizar distintas partes del proceso según criterios diferentes, así como combinarlo con la definición manual.

Los recursos que se deben asignar a las operaciones son tanto máquinas, herramientas y utillajes como recursos humanos. En el caso de estos últimos, son un único tipo de recurso, denominado “Worker” en el diccionario PRD, pero con una determinada especialización que incluye una serie de habilidades. Las operaciones pueden requerir un recurso tipo “Worker” con determinadas habilidades, y para eso podrán ser adecuados recursos de una o varias especializaciones. En adelante, en este apartado, al hablar de recursos se hará referencia tanto a trabajadores como a máquinas, herramientas y utillajes.

Las decisiones tomadas se aplican finalmente sobre la representación digital del proceso: se cargan los modelos de los recursos seleccionados, se asignan a las actividades correspondientes y se modifica la duración de las mismas según la calculada. Será necesario un paso adicional en el que el usuario compruebe que los recursos compartidos no presentan incompatibilidades por actividades solapadas. En caso necesario, debería modificar la fecha de inicio de algunas actividades o asignar recursos adicionales. Ello se realizaría empleando funcionalidades incluidas en el módulo DPM - Assembly Process Planner de CATIA V5.

7.4.3.1 Entradas y requisitos de la etapa

La etapa 3, al igual que el resto o cualquiera de los bloques definidos, tiene como condición suficiente para poderse ejecutar que la entrada sea el proceso digital obtenido del paso inmediatamente anterior. En este caso la entrada se trataría de un archivo de CATIA de proceso (CATProcess). El proceso habrá de tener una estructura con un nodo principal que representará toda la línea, y cuyas operaciones hijas serán las estaciones. Dentro de cada estación estarán todas las actividades necesarias, a partir de esta etapa no se contempla la adición de nuevas.

Figura 78: interfaz de la etapa 3 y su correspondencia con la iDMU del proceso

Las actividades deberán presentar las restricciones de precedencia necesarias. Las estaciones deberán estar totalmente relacionadas por precedencia, si bien en cuanto se inicia la etapa esas relaciones se eliminan, dado que durante el transcurso del tiempo de ciclo las estaciones se ejecutan continuamente de forma simultánea, y así debe aparecer reflejado en el diagrama de Gantt para poder gestionar correctamente el uso de los recursos asignados.

Otro requisito es que las actividades presentes en el proceso tengan asignados los productos adecuados, así como los atributos correspondientes a su tipo.

Esta etapa no puede ejecutarse independientemente, pues requiere información acerca de las condiciones iniciales, relativa al diccionario PRD y a las “Joints” o uniones del proceso de montaje. Previamente se debe realizar un cargado de todo ello, por lo que lo más adecuado es iniciar la etapa desde el botón adecuado de la interfaz principal, cuyo inicio incluye el cargado de toda la información inicial.

7.4.3.2 Salidas de la etapa

La principal salida del sistema sería un modelo digital del proceso de la línea de montaje del nodo industrial en definición. La estructura de dicho proceso sería la definitiva para el nivel de definición del diseño de la industrialización, y los recursos y productos asignados a las actividades serían los adecuados.

En cuanto a la iDMU tras la ejecución de la etapa 3, los productos y recursos implicados no se hallarían adecuadamente posicionados. Su distribución en el espacio de la planta se realiza en el Bloque D, una vez definidos los recursos finales necesarios.

7.4.3.3 Funcionalidades de la etapa

A continuación se describen las principales funcionalidades que soporta la etapa 3. Se trata de la asistencia para seleccionar recursos de entre los disponibles; calcular parámetros de actividades y recursos; definir las variantes de las actividades; optimizar automáticamente estos aspectos; determinar la lista final de recursos y chequear su compatibilidad.

7.4.3.3.1 Selección de recursos

El principal objetivo de la etapa es la asignación de recursos concretos, modelos o trabajadores, a las operaciones del proceso de montaje de la planta o nodo industrial. Esta asignación se puede realizar manualmente o bien de forma automática durante la optimización o la asignación por defecto. Independientemente, siempre se habrán de verificar unas normas. En primer lugar, para cada actividad únicamente se podrán asignar recursos pertenecientes a los tipos concretos asociados al tipo de actividad. Además, se ha definido un número máximo de recursos duplicados por cada actividad. Su valor viene dado por la expresión de la Ec. 7.4.1.

$$N_{MÁX} = \begin{cases} 3, & N_{elems} = 1 \\ N_{elems}/15 & \end{cases} \quad \text{Ec. 7.4.1}$$

Para asignar un recurso manualmente, se debe seleccionar una actividad del explorador, y posteriormente elegir uno de los modelos que se muestran en el desplegable para el tipo de recurso correspondiente. Una vez elegido un modelo, es posible comprobar el valor de las propiedades de la operación en caso de que el recurso fuese finalmente asignado. La Figura 86 muestra la interfaz en ejecución. Como se observa, para uno de los modelos disponibles se comprueba su coste horario y el tiempo de duración de la actividad si se selecciona ese recurso.

Al realizar una asignación, se comprueba que la capacidad del recurso sea superior a la requerida por la actividad. Según el modelo implementado, la capacidad requerida por una actividad se corresponde con el peso del producto que tiene asociado, y principalmente se aplica a actividades que impliquen un movimiento del mismo, como levantamiento o traslación. Si un recurso no tiene ese atributo, el sistema supone que su capacidad siempre será suficiente, por lo que no se chequea. En la Figura 78 se muestra cómo se advierte de que la capacidad del recurso es inferior a la requerida.

Únicamente se muestran los modelos concretos de los tipos de recursos adecuados para la actividad seleccionada. En caso de que únicamente existiese un modelo posible para un tipo de recurso requerido, al iniciar la interfaz se asignaría dicho modelo a todas las operaciones que tuvieran asociado ese tipo de recurso. Cada vez que se inicia la interfaz se realiza un repaso de todas las actividades y se asignan los modelos que no presentan alternativa posible.

Las actividades que no están completamente definidas en cuanto a sus recursos o a su variante, aparecen resaltadas en la zona del explorador de actividades de la interfaz de esta etapa. Aquéllas en las que al menos un recurso no esté asignado, aparecerán en la lista con el término “NAY!!” (Not Assigned Yet), precediendo a su nombre.

7.4.3.3.2 Cálculo de propiedades y parámetros

Durante la ejecución de la Etapa 3 es imprescindible el cálculo de ciertas propiedades de actividades y recursos, y de parámetros del proceso como el tiempo de ciclo o el coste. El objetivo de estimar dichos valores es doble: por un lado se pretende mostrar al usuario información intermedia acerca de recursos que pueden ser asignados. También se brinda la oportunidad de evaluar, para distintas configuraciones posibles, la línea de montaje en términos de tiempos y costes y sus incertidumbres asociadas. Los cálculos se realizan siguiendo las reglas detalladas en el apartado 5.5.3.

Dado que cualquier cambio en el proceso modificaría el valor de la mayoría de parámetros, los cálculos se realizan cada vez que se requiere, en lugar de ejecutarse una única vez y almacenar dichos valores. Almacenar los valores calculados supondría la necesidad de realizar actualizaciones continuamente, con cada nuevo cambio. Se ha rechazado esta posibilidad debido a que entorpecería el proceso de selección de recursos o el tanteo de alternativas, y supone un mayor tiempo de procesado en los procesos de optimización.

Id	ACTIVITY	VARIANT	Time 1 elem./ 1 res. (s)	Uncertainty 95(%)	Resource Speed
G1	Generic	Manual	120	10	0,5
G2		Auto	100	5	0,5
M	Moving	-	300	5	1
PJ1	Positioning at jig	Base component	600	15	1
PJ2		Added component	450	12	1
CS	Combined system connexion	-	180	10	1

Tabla 27: ejemplo de valores empíricos para la estimación de tiempos de actividades

El cálculo de la mayoría de parámetros se realiza con las reglas del apartado 5.5.5, empleando como valores de entrada otros parámetros distintos. Por ejemplo, para calcular el coste de una actividad se requiere el coste horario de los recursos asignados y su porcentaje de asignación a esa actividad (si están también asignados a otras actividades), y el tiempo de ciclo. Este sistema requiere que ciertos parámetros se definan según unos valores de entrada.

La metodología propone que esos valores sean unos tiempos de referencia medidos empíricamente, junto con unos valores de la incertidumbre de dicha medida. La Tabla 27 muestra los valores empleados en las pruebas para algunas de las actividades del PRD definido para la ejecución de los casos de estudio. Los valores para todas las actividades simples del PRD se muestran en la Tabla 18 de la sección 5.5.3.

Los valores no se corresponden con medidas reales, se han rellenado para ser usados meramente como ejemplo. En un caso real, sería necesario realizar una serie de experimentos empíricos para cada tipo de actividad. El objetivo sería caracterizar la distribución normal del tiempo necesario para completar cada actividad simple, empleando un único recurso y para un único elemento (algunas actividades se desarrollan para varios elementos, por ejemplo el proceso de taladrado se ejecuta para varios orificios según la unión; para actividades distintas se considera que únicamente se ejecutan para un elemento).

Para el cálculo se ajustarían los valores empíricos con la velocidad del recurso concreto asignado, el número de ellos asignados y el número de elementos de la actividad. Aunque un tipo de actividad requiera recursos de varias clases, únicamente se emplea el parámetro velocidad de uno de ellos: el recurso dominante.

Uno de los problemas que presentó el desarrollo de esta etapa fue la necesidad de calcular el valor de parámetros cuando no todas las actividades están completamente definidas en cuanto a su variante o a recursos asignados. Un ejemplo muy claro de ello es el tiempo de ciclo, necesario para calcular el coste de cualquier operación y que requiere el tiempo de realización de todas las operaciones de la línea según las reglas del apartado 0. Para estimar tiempos de operaciones no definidas, se ha optado por emplear los valores empíricos ajustándolos según los parámetros que sí estén definidos. Se debe tener en cuenta que todos los valores obtenidos durante la aplicación de la metodología son únicamente estimaciones, dado el bajo nivel de definición del proceso de montaje durante la etapa del ciclo de vida para la que se ideó.

7.4.3.3.3 Definición de variantes de operaciones

La definición de las operaciones de la línea de montaje, además de la asignación de unos recursos concretos, consiste en elegir una variante concreta para todas aquellas que hayan permanecido abiertas. Se debe aclarar que muchas operaciones presentan variantes, pero no todas las definidas para el proceso permanecen abiertas. Por ejemplo, para una operación compuesta de tipo Unión Fuselaje-Fuselaje, las dos primeras actividades hija son de tipo Posicionar en utillaje, actividad que posee dos variantes posibles. Sin embargo, para la actividad compuesta concreta descrita, la primera actividad hija siempre será de la variante Componente base, mientras que la segunda será de la variante Componente añadido. Por

tanto, siempre que se genere una actividad de tipo Unión Fuselaje-Fuselaje, sus dos primeras hijas estarán completamente definidas en cuanto a su variante.

Las actividades compuestas no se admite que lleguen a esta etapa con una variante abierta, dado que presentar una variante u otra en una actividad compuesta condiciona las hijas que tenga en número y tipo, por lo que hace que la estructura del proceso varíe. Esto no es deseable en esta etapa dado que dicha estructura ya queda fijada desde la etapa anterior, descrita en el apartado 0. Por esta razón, al iniciar esa etapa, se asigna una variante a todas las actividades compuestas que aún no posean una definida.

Para todas las operaciones simples que no tengan una variante definida, se les debe asignar una antes de seleccionar sus recursos, puesto que requerirá recursos de un tipo u otro dependiendo de su variante. En el desplegable de la zona central superior de la interfaz aparecen las variantes disponibles de una determinada actividad. En la zona del explorador de operaciones de la parte izquierda, al igual que con las actividades sin todos los recursos asignados, se destacan las que no tienen una variante definida. En este caso se hace anteponiendo la etiqueta "Gen!!" (por Generic) al nombre de la actividad.

Se debe señalar que aunque una actividad simple ya tenga una variante asignada, se permite que se seleccione otra distinta. Hacer esto implica que los recursos que tenga asignados esa actividad se desvinculen y sea necesario asociar unos nuevos.

7.4.3.3.4 Optimización de la asignación

En la metodología se incluye la posibilidad de seleccionar los recursos concretos requeridos de forma óptima atendiendo a varios criterios posibles. No se trata de una optimización que siga ningún procedimiento matemático. Únicamente se recorre la estructura de proceso y para cada decisión se evalúan las alternativas disponibles. No obstante sí se siguen ciertas reglas para obtener soluciones de mayor calidad. En el caso de la optimización atendiendo al coste, se da preferencia a seleccionar recursos que ya se encuentren asignados a otras actividades, y que puedan ser compartidos; y únicamente se duplica un recurso si su capacidad no es suficiente. Estas consideraciones no se aplican al optimizar atendiendo al tiempo.

Se posibilita realizar la optimización en zonas concretas de la estructura de proceso. Por ejemplo, se puede optimizar atendiendo al coste una estación entera y posteriormente ejecutarlo atendiendo al tiempo únicamente para la actividad de mayor duración.

Además, durante la optimización, las operaciones abiertas en cuanto a su variante también quedan definidas. Para cada posible variante se realiza una optimización según el criterio vigente, y aquélla que obtenga un mejor resultado es la que prevalece.

Los criterios de optimización incluidos en esta etapa son 3: según el tiempo, según el coste y según una combinación de ambos. El primero implica buscar las opciones de menor coste compartiendo recursos siempre que sea posible; el segundo busca la máxima rapidez en la ejecución de las operaciones sin priorizar la compartición, y el tercero minimiza la suma ponderada de coste y tiempo con unos pesos según preferencias del usuario, procurando emplear recursos compartidos también. Los pesos de cada parámetro en este último criterio son modificables por el usuario, como se detalla en el apartado 7.4.3.5.

Los recursos asignados al optimizar o manualmente no necesariamente coincidirán con la lista definitiva de recursos de la línea, dado que para terminar la etapa se requiere que se compruebe la factibilidad de compartir recursos, como se explicará en el apartado 7.4.3.3.6. El proceso de optimización no consiste en una búsqueda de los recursos definitivos en su mejor configuración, sino que es una parte de un proceso iterativo.

7.4.3.3.5 Determinación de los recursos finales y carga de modelos en el iDMU

Una vez se han seleccionado unos recursos concretos para todas las operaciones del proceso, se debe definir cuántos de ellos se incluirán en el proceso final, dado que muchos podrán ser compartidos por varias operaciones de una estación, mientras que otros se podrán compartir entre estaciones y otros se deberán duplicar para igualar la capacidad requerida en una actividad o para completarla en un tiempo menor.

El proceso de determinación del número final de cada modelo de recurso asignado se realiza de forma automática, según dos caminos posibles. En el primero se da por supuesto que todos los recursos de una estación se pueden compartir perfectamente entre actividades, y aquéllos con el valor adecuado de la propiedad “Addition” también entre estaciones. Así se determinará un número mínimo de recursos necesarios de un modelo según el máximo de ellos asignado a una única actividad. El otro camino determina una nueva unidad de un modelo cada vez que éste está asignado a una actividad.

Antes de ejecutar este procedimiento, se le pregunta al usuario cuál de los dos caminos se debe seguir. Se ha denominado la Regla de la Compartición Perfecta a seguir el primero de los dos caminos. Se debe precisar que ninguno de los dos caminos conduce a la lista definitiva de los recursos de la línea, puesto que se requerirá un chequeo de la factibilidad de la compartición de recursos; o bien una posible eliminación de recursos duplicados que puedan ser compartidos, según se siga un camino u otro.

Los modelos CAD de los recursos asignados se deberán cargar en la iDMU del proceso, y asignar a las operaciones correspondientes. Algunos de los modelos de recursos tienen asignado el archivo CAD de su representación virtual, pero es posible que existan otros en el diccionario PRD que no. En este procedimiento se verifica que todos los modelos tengan un archivo CAD asociado, y para aquéllos que no, se crea uno automáticamente, se guarda en una dirección especificada por el usuario y se asocia al objeto correspondiente.

La geometría de los modelos CAD generados automáticamente es siempre la misma: un prisma ortogonal con dos aristas de 250 mm y una de 180 mm. Los trabajadores se cargan como productos con uno de los humanos que CATIA V5 permite representar. Asociar una geometría a todos los recursos se considera necesario para una posterior distribución del espacio de la planta. En todos los casos, el archivo final que representa el recurso será un CATProduct.

Todos los modelos digitales de los recursos son, como se ha comentado, CATProducts, es decir, instancias de unas piezas geométricas guardadas en otros archivos, denominados CATParts. Los CATProducts pueden instanciar varias piezas, o tener información adicional, como posicionamiento o propiedades. Sin embargo, para cargar adecuadamente los recursos en la iDMU, es necesario cargar un CATProduct diferente por cada unidad de ese modelo asignada. La alternativa sería cargar el mismo archivo en el proceso las veces que fuesen necesarias. Sin embargo, eso implicaría que el valor de las propiedades sería el mismo para cada ejemplar cargado, puesto que sería el mismo archivo. Para propiedades relativas a prestaciones del recurso (velocidad, capacidad de carga) eso no sería un problema dado que se mantienen para el mismo modelo; sin embargo para propiedades únicas de cada ejemplar no se podría aplicar. Por ejemplo, dos recursos, aun siendo del mismo modelo, pueden tener un grado distinto de asignación a una actividad.

La solución adoptada es generar un nuevo CATProduct que instancie al original para cada unidad asignada de un modelo. La Figura 79 muestra un modelo CAD creado a partir de una forma genérica para un recurso. Se puede observar en su árbol de producto que aunque la pieza y su representación como componente tienen el nombre genérico “Generic resource”, el nodo superior que representa al producto completo tiene el nombre del modelo de recurso, que en este caso es DG1. La Figura 80 es el modelo CAD para trabajadores, o recursos del tipo “Worker”.

Figura 79: forma geométrica del modelo CAD generado para los modelos que no tuvieran ninguno asignado

Figura 80: representación CAD de un trabajador.

7.4.3.3.6 Chequeo de compatibilidad de recursos compartidos y duplicidades

La última funcionalidad que incluye el Bloque B consiste en un chequeo cuyo objetivo es verificar que las asignaciones de recursos a las actividades de la línea son compatibles. Concretamente, se trata de que no haya ninguna unidad de recurso que se haya asignado cuando era posible que otro ejemplar se compartiera y que los recursos no sean compartidos por actividades que se ejecuten simultáneamente o se solapen.

No se ha desarrollado ningún procedimiento automático para ejecutar esta verificación, sino que se ha optado por establecer el uso de las herramientas disponibles en CATIA V5 para cubrir la funcionalidad. La automatización era una opción factible, pero se descartó debido a que las acciones posibles mediante el uso interactivo de los comandos existentes otorga al usuario un adecuado grado de control y poder de decisión. Además el módulo de CATIA que se propone para la definición de procesos incluye la visualización de los diagramas de Gantt de las actividades de cada documento y de la asignación de los recursos a ellas, de manera que el usuario puede valorar claramente cada cambio.

Las acciones que incluye esta funcionalidad, y que son soportadas por el uso interactivo de CATIA, son 4: el desplazamiento de actividades en el tiempo, es decir, modificar su momento de inicio; la creación de nuevas restricciones de precedencia; la asignación y la desasignación de recursos a una actividad.

Con estas acciones, se persigue que en los procesos de cada línea no haya ningún recurso que esté asignado simultáneamente a dos actividades en algún momento del ciclo (excepto si la propiedad Addition del tipo de recurso lo permite específicamente, como se verá más adelante). Para corregir este tipo de situaciones, el usuario puede seguir dos caminos distintos. El primero consiste en mantener los recursos asignados y desplazar las actividades a las que están asignados, o bien crear nuevas restricciones de precedencia, de forma que los recursos compartidos se usen en distintos momentos. La alternativa consistiría en desasignar los recursos compartidos e incluir nuevas unidades. Así, las actividades que se solapen utilizarían recursos distintos y no supondría ningún problema de compatibilidad.

Figura 81: actividades a las que están asignados los recursos correspondientes al trabajador técnico de logística 1 y el puente grúa BOBCs1500 1.

Figura 82: actividades a las que están asignados los recursos correspondientes al trabajador técnico de logística 1 y el puente grúa BOBCs1500 1, tras corregir incompatibilidades.

El entorno CATIA permite visualizar un diagrama de Gantt en el que se muestran las actividades a las que está asignado cada recurso. El momento de inicio y las relaciones de precedencia se pueden manipular desde dicha pantalla de visualización. La Figura 81 muestra la visualización de las actividades a que están asignados un recurso de tipo trabajador y una grúa. Ambos están asignados a las mismas actividades, de las cuales las 2 primeras se solapan, "Load and Position RFF" y "Load and Position RFBL". Desde este entorno de visualización es posible la creación de una nueva restricción de precedencia entre las actividades mencionadas. Consistiría en establecer que, ya que tienen el mismo recurso asignado, que una de las dos no pueda comenzar antes de que finalice la otra. La Figura 82 muestra el diagrama de Gantt de las actividades una vez corregida la incompatibilidad.

Cada camino tiene ventajas e inconvenientes. La modificación del inicio de actividades o creación de nuevas restricciones de precedencia supone, en principio, menos costes al requerir un menor número de recursos. Sin embargo, puede suponer que el tiempo de duración de la estación sea mayor. Además, si dicha duración excede el tiempo de ciclo del proceso, ese será el nuevo valor de dicho parámetro, lo que incurriría en un aumento de los costes de todo el proceso, puesto que el coste de uso de los recursos se estima en función del tiempo de ciclo. El usuario puede valorar las dos opciones ejecutando la evaluación del nodo, en la cuarta etapa del bloque, que se explica en la sección 7.4.4.

7.4.3.4 Programación

En este apartado se describen métodos concretos desarrollados para obtener las funcionalidades ideadas para esta etapa. Se han incluido aquellos métodos cuya estructura presente particularidades que lo distingan de otros calificables como únicamente rutinarios. Se ha descrito el cálculo de parámetros y el procedimiento automático de automatización. Además se describe las reglas definidas para soportar la posibilidad de que existan recursos compartidos en una misma estación, estaciones distintas, simultáneamente o no.

7.4.3.4.1 Cálculo de parámetros

Los parámetros se calculan de manera recursiva, la función donde se implementa incorpora llamadas a sí misma durante su ejecución. De esa forma, si un atributo de una actividad compuesta tiene una fórmula que requiere el valor de atributos análogos de sus actividades hijas, sencillamente se vuelve a llamar a la función para cada una de sus hijas mientras la primera ejecución aún sigue en curso.

Como se ha comentado previamente, el tiempo de ciclo es uno de los atributos que se deben calcular para hallar el valor de otros. Para números elevados de actividades, eso puede requerir un tiempo de procesado demasiado alto, dado que para calcular ciertos atributos de cada actividad, como su coste, habría que repetir todo el cálculo del tiempo de ciclo.

Para solucionarlo, una opción consistiría en calcular el tiempo de ciclo una vez, y luego almacenarlo como una propiedad, del objeto IndustrialNode por ejemplo. Sin embargo, esto implicaría que fuese necesario actualizar el tiempo de ciclo tras cada cambio menor.

Figura 83: diagrama de flujo para el cálculo recursivo del coste de una operación.

La solución propuesta consiste en calcular el tiempo de ciclo una única vez durante el cálculo de atributos y almacenarlo como propiedad de *IndustrialNode*. Cuando el proceso implica calcular esos atributos para las actividades implicadas, el tiempo de ciclo no se calcula de nuevo, sino que se emplea el valor almacenado. La Figura 83 muestra el diagrama de flujo desarrollado para el cálculo del coste de una operación de forma recursiva.

Como se observa en el diagrama, el tiempo de ciclo se calcula una única vez, cuando se llama a la función empleando como argumento de entrada el nombre del atributo “Cost”. En el resto de las llamadas de la ejecución recursiva se usa el nombre de atributo “medium cost”, para calcular el coste de las actividades hijas implicadas, o “Hourly Cost”, para el cálculo del coste horario de los recursos de cada actividad.

La secuencia que sigue la ejecución sería la siguiente. Tras la primera llamada al cálculo del atributo “Cost” de una actividad, se recorren todos los recursos que tenga asignados y para cada uno se llama a la misma función, para calcular el atributo “Hourly Cost” de cada uno. Tras cada una de estas llamadas el valor de salida (variable *oValue*) se actualiza sumando el producto del coste horario de cada recurso y el tiempo de ciclo previamente calculado. Tras haber recorrido todos los recursos asignados a la actividad para la que se llamó inicialmente a la función, se realiza un recorrido por todas las actividades hijas que tenga. Para cada una de ellas se vuelve a llamar a la función, pero empleando como parámetro de entrada un nombre de atributo distinto: “medium cost”. De esa forma, no se repite el cálculo del tiempo de ciclo, como se haría si se realizara una llamada con el argumento “Cost”, únicamente se emplea el valor ya calculado.

7.4.3.4.2 Gestión de recursos compartidos y duplicados

La forma en que un recurso puede ser compartido por varias actividades, o asignado una o varias veces a una actividad, viene dada por la propiedad *Addition* del Tipo de Recurso. Existen diversas posibilidades, que se describen a continuación.

- Recursos únicos en una estación
- Recursos que pueden compartirse entre actividades de estaciones distintas. Se trata de recursos que se pueden desplazar fácilmente por la planta, como puentes grúa y otros recursos destinados al transporte de productos. El valor de su propiedad *Addition* será “Sharable between stations”.
- Recursos que pueden compartirse entre actividades simultáneas. Son recursos que se pueden usar simultáneamente en varias actividades. Es el caso, por ejemplo, de utillajes de base sobre los que se coloca el producto en una estación. En este caso el valor de su propiedad *Addition* podrá ser “Sharable simultaneously” o “Sharable between stations simultaneously”.
- Recursos que pueden compartirse entre actividades de la misma estación no simultáneas. Se trata del resto de recursos. En este caso añadir nuevos ejemplares puede implicar que la velocidad de ejecución de la actividad se multiplica, si su propiedad *Addition* es “Linear in speed”; que se multiplique la capacidad, con lo que la propiedad valdría “Linear in capacity”; o bien ninguna de las dos cosas. En algunas actividades, se especifica qué recursos requeridos se consideran del tipo “Linear in capacity” y cuáles “Linear in speed”. En tal caso prevalece lo especificado en la actividad.

7.4.3.4.3 Optimización de la asignación de recursos

Como se ha comentado previamente, la optimización de la asignación de recursos recorre la estructura del proceso y define una variante y/o asigna recursos concretos a las actividades que lo requieran. Para cada posible decisión se evalúan las opciones disponibles según el criterio de optimización. La Figura 84 muestra el diagrama de flujo desarrollado para optimizar el coste en la asignación de recursos de cualquier actividad, simple o compuesta. El hecho de que sirva para toda clase de actividades es necesario para que esta funcionalidad se pueda aplicar a sólo una parte de la estructura de proceso.

Como se puede observar, en primer lugar, se comienza recorriendo todos los recursos requeridos por la actividad a optimizar. Para cada uno sin definir se seleccionará el modelo concreto más conveniente.

Primero, de entre los modelos disponibles para un recurso requerido, se preseleccionan los que ya han sido asignados con anterioridad en esa estación. La razón de ello es que eso hace que se compartan recursos con mayor probabilidad en lugar de asignar nuevos, con lo que se reduce el coste. De entre los preseleccionados, se trasladan a otra lista aquéllos que posean la capacidad de desempeñar el papel de varios recursos simultáneamente en la actividad (en el diccionario PRD son modelos que tienen varios tipos, separados por el signo “+” en lugar de “;”). Un ejemplo de estos recursos sería un utillaje que tuviera también la función de elevador. Estos recursos se separan porque se comparan de una manera distinta.

A continuación se recorren los recursos preseleccionados restantes: cada uno se asigna a la actividad y se calcula el coste de la misma. Se va almacenando el valor que sea más bajo y cuando se finaliza el bucle, éste será el recurso que se seleccione. En caso de que un único modelo del recurso no cubra la capacidad de la actividad, se añade una nueva unidad, se comprueba de nuevo y así sucesivamente hasta que la capacidad rebasa la requerida o el número de recursos es mayor que el máximo admitido. El coste también se habría ido multiplicando.

Si tras recorrer todos los recursos preseleccionados no se ha escogido ninguno, se crea una nueva lista de preseleccionados con los modelos restantes y se ejecuta de nuevo los últimos pasos. Todo lo anterior se debe repetir para todos los recursos requeridos.

Finalmente, se compara el resultado obtenido con el que se obtendría eligiendo uno de los recursos que pueden desempeñar varias funciones simultáneamente dentro de una actividad, y optimizando la elección del resto de recursos. La opción con mejores resultados se elige y la actividad se define de esa forma.

Si la actividad de entrada tiene hijos, se deben añadir nuevas etapas. Se obtendrían primero todas las actividades implicadas en la actividad de entrada de la función. Esto no es un procedimiento trivial como podría ser obtener sólo sus hijos, puesto que algunos de ellos puede que tengan hijos a su vez. Por esa razón se hace necesaria una función recursiva complementaria.

Una vez encontradas todas las actividades implicadas, se deben ordenar en una lista en orden decreciente de duración. Ese será el orden en que se optimicen, dado que a mayor duración, la eficiencia en el uso de sus recursos asignados será mayor. Dado que a las actividades definidas después preferentemente se les asignan los recursos ya asignados a otras, se consigue así una mayor eficiencia.

Figura 84: diagrama de flujo para la optimización según el coste.

En caso de que la actividad de entrada no tenga una variante definida, se ejecuta el proceso de selección óptima de una variante. Dado que ello implica la optimización de la actividad, después de completar este paso, la ejecución llega a su fin. La selección óptima de una variante se hace siguiendo el diagrama mostrado en la Figura 85.

Figura 85: diagrama de flujo de la selección de una variante para una actividad durante el proceso de optimización.

7.4.3.5 Interfaz

El diseño de la interfaz para la etapa 3 tenía la dificultad derivada de que había un gran número de funcionalidades que debían ser incluidas, y todas ellas debían ser accesibles para el usuario con una visibilidad aceptable. En el diseño final se pudieron incluir las funcionalidades deseadas gracias a que muchas de ellas están incluidas de forma que son accesibles después de pulsar un botón. La Figura 86 muestra la interfaz junto con la explicación de sus distintas áreas y botones. Un ejemplo de lo anterior sería el selector del criterio de optimización, en la zona inferior izquierda: al pulsar uno de los tres botones, la forma de optimizar la definición de actividades cambia de criterio. Así, se consigue incluir varias funcionalidades en el espacio que ocuparía una sola.

Otro objetivo que sería cumplir con la interfaz es que posibilitara una fácil comparación entre varias alternativas en cuanto a selección de un recurso, o determinación de la variante de una actividad. Se estima que eso está conseguido con el diseño actual, puesto que la forma de examinar las propiedades de una actividad tiene bastante visibilidad, y resulta intuitivo que si se cambia algún recurso asignado o la variante de la actividad, se podrá examinar las repercusiones en lo que respecta a propiedades de esa actividad y del proceso.

En cuanto a la forma en que la interfaz está programada, se debe destacar que trabaja con objetos creados internamente, de las clases adecuadas del modelo de información descrito en el apartado 0. La información de dichos objetos se extrae de los objetos CATIA definidos hasta el momento (actividades y productos principalmente) al iniciar la interfaz; luego, después de interactuar con ellos de la forma deseada, se pulsa el botón de aplicar y los objetos CATIA se actualizan con la nueva información. La razón de trabajar de esta forma en lugar de directamente sobre los objetos de CATIA es que la extracción y entrada de información para estos objetos es más lenta, y para procedimientos muy largos puede dar lugar a tiempos de espera que impidan la comparación ágil entre varias alternativas. Además, como se ha comentado anteriormente, los objetos CATIA capturados caducan tras cierto tiempo, lo cual complica la programación directa con ellos.

Los botones “Apply”, “Hide” y “Close” son análogos a los incluidos en otras interfaces. El primero sirve para aplicar todos los cambios definidos en la interfaz, modificar la iDMU según la información definida. El botón “Hide” se emplearía para ocultar la interfaz y poder trabajar directamente con CATIA. Es útil para poder visualizar cualquier aspecto del proceso mientras se completa esta etapa, como por ejemplo el diagrama de Gantt, o los modelos digitales de productos y recursos. Al pulsar el botón que inicia la interfaz, ésta se muestra automáticamente, y guarda la misma información que antes de ocultarla. Por último, el botón “Close” sirve para cerrar la interfaz, sin guardar ninguna información.

Optimizing criterion selection buttons

Al pulsar cada uno de ellos, el criterio cambia a Coste, criterio Mixto o Tiempo, respectivamente. El texto del resto de botones de optimización se actualiza.

Mixed criterion weights definition

Al pulsar el botón relativo al criterio mixto, se muestra un formulario que permite modificar los pesos de Coste y Tiempo para el criterio.

Activities explorer area

Se muestran todas las actividades hijas de la actividad que está desarrollada en la parte central. Si se selecciona una de ellas, esa pasa a ser la actividad a desarrollar. Si se hace doble click en una actividad, se muestran sus hijas en caso de tenerlas, al igual que al pulsar el botón "Open"

Optimize activity

Se optimiza la actividad seleccionada y según el criterio vigente.

Optimize resources

Se asignan los modelos óptimos a los recursos requeridos, según el criterio vigente.

Optimize whole process

Se optimiza el proceso completo según el criterio vigente

Developed activity area

Se muestran los detalles de la actividad que se halla seleccionada.

En el desplegable superior se muestran las variantes posibles de la operación. Si no tuviera ninguna seleccionada aparecería el término "Keep open". Si se selecciona una variante distinta y se pulsa "Select", se desasignan todos los recursos que hubiera asignados y se actualiza toda la información.

Properties

Se muestran los atributos de la actividad. Al pulsar en uno, se muestra su valor para la configuración actual de la actividad

Resources

Se muestran los recursos requeridos por la actividad. Al pulsar el botón "Assigned", su texto cambia alternativamente a "Unassigned"; al pulsar "Show" se mostrarán los recursos ya asignados o aún por asignar según dicho texto.

En el desplegable se muestran los modelos disponibles para el recurso requerido seleccionado.

La zona derecha muestra las propiedades del modelo seleccionado. Al pulsar sobre una se muestra su valor según la configuración actual.

El botón "Add" hace que se asigne el modelo seleccionado al recurso requerido seleccionado. En el proceso representaría la adición de un nuevo ejemplar para esa tarea.

Pulsar el botón "Replace" hace que los modelos asignados para el recurso requerido se desasignen y reemplacen por el modelo seleccionado.

Figura 86: interfaz para la gestión de los recursos asignados y definición de las operaciones.

7.4.4 Etapa 4: Evaluación parcial del nodo industrial

La última etapa del Bloque B no está dirigida a la definición de la línea de montaje, como el resto del bloque. En esta etapa únicamente se evalúa la línea de montaje asociada al nodo industrial, definida de manera conceptual. Se cubren dos objetivos, en primer lugar, así el usuario puede valorar si la línea, tal y como se ha diseñado, es válida o se debe modificar. Por otra parte, los resultados obtenidos de esta evaluación se exportarán al documento general que representa la solución completa y se almacenarán como propiedades de la actividad que representa al nodo industrial. De esa forma, al efectuarse la evaluación completa de la solución, tan solo será necesario recuperar dichos valores, en lugar de cargar la representación de la línea de cada nodo y repetir los cálculos.

La estructura de este apartado sigue la de los anteriores, en los que se detallaban las otras etapas del bloque. Primero se describirán las entradas esperadas y requisitos de la etapa y posteriormente la información que se obtiene de la misma. Se detallarán las funcionalidades que incluye la etapa y, por último, la manera en que se ha programado su implementación en la primera aplicación prototipo.

Para esta etapa no se ha incluido una sección relativa a su interfaz, puesto que no se ha desarrollado ninguna con cierta importancia dentro de la metodología. Únicamente se muestra un cuadro de diálogo muy sencillo en el que se muestran los resultados obtenidos por pantalla. Se incluyen imágenes de dicho cuadro en el 0, concretamente la Figura 125 y la Figura 146, para los casos de estudio CU1 y CU2, respectivamente.

7.4.4.1 Entradas y requisitos

La información de entrada para esta etapa está incluida en el documento de representación digital de la línea de montaje, en el estado de definición que se obtiene tras la aplicación de la etapa anterior del Bloque B. El documento mencionado, y la parte de la solución que representa, debe tener una estructura de procesos totalmente definida, con las estaciones definitivas con sus respectivas operaciones asociadas y las variantes específicas de cada una ya fijadas. Además, los recursos deben estar asignados, debe haber el número definitivo de recursos concretos, teniendo en cuenta si son compartidos o no entre actividades y de los modelos o especialidades adecuados.

Las actividades incluidas en la estructura de proceso deben estar situadas de manera definitiva en el eje temporal, de forma que, además de mantenerse las restricciones de precedencia, lo cual se impone de manera automática al generarse la representación de la línea, no existan incompatibilidades por la utilización de recursos compartidos. En la etapa previa se debe realizar un repaso interactivo del diagrama de Gantt de la línea para solventar posibles incompatibilidades de este tipo, desplazando actividades en el tiempo o asignando más unidades de los recursos compartidos.

En definitiva, se puede decir que el único requisito estricto para la aplicación de esta cuarta etapa es la existencia de una estructura de procesos en el documento de representación de la línea, si bien para obtener los resultados adecuados de la evaluación es necesario que se haya aplicado previamente la etapa 3 de forma completa.

Toda esa información se captura de forma automática al ejecutarse un procedimiento definido expresamente para ello, que genera los objetos de las clases adecuadas, como los de clase Station, ActivityObject o ResourceObject, a partir del árbol PPR del documento CATProcess de representación de la línea. Tal procedimiento se ejecuta tanto al principio de esta etapa como de la anterior, si bien se aplica ligeramente distinto debido a las diferentes condiciones de cada caso. Está incluido entre lo que se ha denominado procedimientos de extracción de información, que se detallan en la sección 8.2.2.2.2.

7.4.4.2 Salidas

La salida de esta etapa consiste en los resultados de la evaluación del nodo industrial cuya línea de montaje asociada se ha definido a lo largo del bloque. La evaluación se hace respecto a los mismos parámetros que se tienen en cuenta para la evaluación de la solución completa: tiempos, costes y eficiencia en el uso de recursos. Los resultados obtenidos proporcionan al usuario una visión adecuada del impacto de la línea de montaje del nodo sobre el proceso de montaje, lo cual le puede servir para valorar si esa configuración es la adecuada para esa parte de la solución.

Esta etapa no tiene como único objetivo la valoración de la línea del nodo industrial, sino que también desempeña un papel dentro de la evaluación de la solución completa. Los resultados de esta evaluación, que se podría describir como local, se exportan al documento de representación de la solución general, y se almacenan los distintos valores obtenidos en los atributos correspondientes de la actividad que representa al nodo industrial en dicho documento. De esa forma, al ejecutar el Bloque E para la evaluación de todo el proceso de montaje no es necesario que se realice una evaluación de la línea de cada nodo, únicamente se emplean los valores almacenados como propiedades de los elementos que representan a los nodos industriales en el documento general.

La condición para que esta manera de proceder funcione adecuadamente es que después de definir cada línea de montaje, ejecutando las etapas 1 a 3 del Bloque B, siempre se proceda a ejecutar la evaluación. Así, se mantendrán actualizados los valores de los distintos parámetros.

7.4.4.3 Funcionalidades

A continuación, se explican las principales funcionalidades que se han definido para esta etapa del Bloque B. Como resulta evidente, la principal de ellas será la del cálculo de los atributos que conforman los parámetros de evaluación de cada nodo, que coinciden con los de la solución completa: tiempos, costes y eficiencia en el uso de recursos.

Además, se describe la funcionalidad relativa a la exportación de los resultados al documento que representa la solución global, de forma que en la evaluación de todo el proceso de montaje baste con emplear dichos valores, en lugar de cargar la representación digital de la línea de cada nodo y volver a realizar los cálculos requeridos.

7.4.4.3.1 Cálculo de atributos del proceso asociados a la línea

La principal funcionalidad dentro de la etapa es el cálculo de los valores de tiempos, costes y eficiencia de los recursos para la línea industrial definida en el bloque. Se trata de una evaluación de carácter local, y que no tiene en cuenta las características de otros nodos industriales del proceso.

En cuanto a tiempos, se desea obtener el valor de lo que se denomina tiempo de ciclo del nodo. Si el tiempo de ciclo del proceso es el que transcurre, para todo el proceso de montaje, entre dos cambios de estación, el tiempo de ciclo asociado a un nodo será el que se obtendría si dicho nodo fuera el único de todo el proceso. Es decir, se calcula como el tiempo de duración máximo de entre todas las estaciones de la línea de montaje de ese nodo industrial. El valor del tiempo de ciclo del proceso completo irá variando a medida que se vayan definiendo todas las líneas de montaje implicadas, por lo que se ha juzgado que no tiene mucho sentido incluirlo. El tiempo de ciclo del nodo se calcula según las ecuaciones Ec. 5.5.14 a Ec. 5.5.16.

Para el cálculo de tiempos en esta etapa se tienen en cuenta los recursos finalmente asignados a las actividades de la línea. Se actualiza el valor de cada actividad simple según ello, y también se tiene en cuenta las actividades que hayan sido desplazadas en el eje temporal para compatibilizar el uso de recursos compartidos.

Los costes que se calculan en esta etapa están relacionados directamente con la ejecución de las tareas incluidas dentro de la línea de montaje. A su vez, los costes de dichas tareas vienen determinados por la utilización de los recursos que tienen asignados. En otros momentos de la aplicación de la metodología se calculan los costes de la línea realizando un repaso por las distintas actividades de la misma y sumando el coste horario de cada recurso asignado multiplicado por el tiempo de ciclo. Sin embargo, dado que en este punto se dispone de los recursos definitivamente asignados a la línea, se realiza un repaso de los mismos directamente.

De esa forma, el proceso es más simple e igual de preciso, dado que si se realiza un repaso de todas las actividades, para cada recurso compartido entre varias, se debe realizar un reparto de su coste, según todas las actividades a las que se haya asignado, que se deben determinar con antelación. Todo ello es excesivamente complejo y representa una posible fuente de errores, por lo que finalmente se ha implementado el sistema basado en un repaso de los recursos. El cálculo del coste de un nodo se realiza

Asimismo se debe tener en cuenta es que el coste se calcula empleando el valor del tiempo de ciclo del nodo, y no el valor del proceso general. El tiempo de ciclo final del proceso será igual o mayor que el hallado para el nodo, por lo que el valor del coste de la línea de ese nodo deberá ser modificado en la evaluación final. El coste de los procesos de la línea se calcula empleando la Ec. 5.5.23 para todas las estaciones de la línea y sumando sus costes.

El otro parámetro importante que se debe calcular es la eficiencia en el uso de los recursos. Como ya se ha comentado, la eficiencia del uso de un recurso se define como la proporción del tiempo de ciclo que dicho recurso está siendo directamente utilizado en una actividad del proceso. La eficiencia del nodo completo será la media de las eficiencias de todos los recursos asignados a alguna de sus actividades, ponderándola según el coste horario de cada una. Para la eficiencia también se emplea el valor del tiempo de ciclo local, o del nodo, por lo que al usar dicha eficiencia en la evaluación general, se habrá de compensar con el tiempo de ciclo global. Para determinar la eficiencia del uso de recursos en el nodo se han utilizado las ecuaciones Ec. 5.5.26 y Ec. 5.5.28.

Por último, también se calcula la incertidumbre asociada a cada uno de los parámetros anteriores, teniendo en cuenta las consideraciones expuestas en el apartado 5.5.3, y se ha utilizado finalmente la Ec. 5.5.13 del mismo y las ecuaciones Ec. 5.5.29 a Ec. 5.5.42.

7.4.4.3.2 Visualización y exportación de los valores

Una vez se ha evaluado el nodo industrial en los términos en que se valora el proceso completo, se muestran por pantalla los resultados y se posibilita que sean exportados al documento general de representación de la solución. De esa forma, se almacenan los valores como propiedades de la actividad que representa al nodo en dicho documento y, en el momento de lanzar la evaluación del proceso completo, basta con recuperarlos de ahí. Por lo tanto se elimina la necesidad de repetir los cálculos o abrir los documentos representan las líneas de montaje de los nodos industriales.

Si bien la visualización de los resultados aporta información relevante, su exportación no representa ninguna utilidad directa para el usuario, por lo que podría argumentarse que no es una auténtica funcionalidad de la etapa. Sin embargo, si se tiene en cuenta la importancia de la evaluación del proceso completo en el Bloque E, y se acepta que la determinación de valores mediante evaluaciones locales de los nodos es un enfoque adecuado, es fácil concluir que la exportación de los resultados locales al documento general es un proceso totalmente necesario. Es decir, la exportación es fundamental para ejecutar la evaluación global de forma eficiente (sin repetir cálculos ni cargar otros documentos), lo cual sí supone un valor añadido de la metodología.

7.4.4.4 Programación

Tras describir las funcionalidades que se incluyen en la etapa, en esta sección se detalla cómo se programaron en la implementación realizada de la metodología. El cálculo de propiedades según unas fórmulas puede parecer fácilmente programable pero, como se comenta en la sección, tiene asociada cierta complejidad, derivada del número de elementos que intervienen en cada línea de montaje y de la manera en que ésta es definida y puede modificarse.

Los atributos que se deben evaluar están relacionados entre sí. Por ejemplo, el coste de cualquier actividad, según el modelo que se propone, únicamente se puede determinar conociendo el valor del tiempo de ciclo; la eficiencia de un recurso requiere para su cálculo el tiempo de duración de las actividades a las que está asignado y el valor de la eficiencia total del uso de los recursos del nodo está influenciado por el valor del coste de los procesos de su línea de montaje asociada. Por esta razón, la secuencia adecuada para el cálculo de los atributos mencionados es comenzar por el tiempo de ciclo, seguido del cálculo del coste de la línea y, por último, del cálculo de la eficiencia del uso de los recursos. A continuación se describe la manera en que se codificó el cálculo de dichos parámetros, en el orden descrito, y de su incertidumbre.

7.4.4.4.1 Cálculo de tiempos

La programación del cálculo de los tiempos asociados a la línea de montaje tiene una complejidad mayor de lo esperable, debido principalmente al método mismo que se ha propuesto para la misma definición de la línea. Como ya se ha descrito, en la última etapa de dicho proceso, se requiere que se revise la compatibilidad del uso de los recursos compartidos entre actividades. En caso de que varias actividades se realicen durante un mismo período y compartan un mismo recurso, se debe realizar una modificación: o bien se asigna a una de ellas una unidad adicional de ese modelo de recurso, o se desplaza una de las dos en el eje temporal, de forma que se completen en diferentes momentos.

Si se toma esta segunda medida, las uniones entre los objetos que representan las actividades ya no reflejarán de manera fiel la secuencia de realización que siguen éstas. Por ejemplo, si se desplaza la segunda operación de una estación para que no se solape con la primera, ya que ambas comparten un recurso, ya no se podrá calcular el tiempo de duración de la estación basándose en las relaciones de precedencia previas, pues según eso ambas se realizarían a la vez; se deberán establecer nuevas relaciones. A ello se suma que el tipo de acciones descritas no se realiza a través de ninguna interfaz programada, lo que facilitaría un trabajo con los objetos adecuados que permitiese la creación de nuevas relaciones. La metodología, o al menos la primera implementación realizada, propone que se realicen de forma interactiva mediante las funcionalidades disponibles en CATIA para modificación del diagrama de Gantt de la estructura de procesos de un documento CATProcess.

Por tanto, la determinación del tiempo de ciclo del nodo únicamente mediante código programado se ha considerado una opción con demasiada complejidad. Por otra parte, al realizarse de forma interactiva el último paso de la etapa anterior, las propiedades que existen por defecto en los elementos de representación del documento se actualizan con cada cambio., y el tiempo de duración de las actividades del árbol PPR es una de dichas propiedades. Por tanto, si se modifica una de las actividades del árbol en cuanto a su duración o a su fecha de inicio, el tiempo de las actividades compuestas a las que pertenece queda automáticamente actualizado, ya que se mantienen las restricciones de precedencia del modelo, que también se crearon cuando se generaron todas esas actividades. Luego bastaría programar la lectura de la propiedad tiempo, que CATIA crea por defecto en cada actividad, de la actividad de mayor nivel del árbol PPR, que representaría el proceso completo de la línea, con todas sus estaciones.

Sin embargo, con ello no es suficiente, aunque sea la manera más sencilla de tener en cuenta las modificaciones dentro del diagrama de Gantt realizadas de forma interactiva. También se debería tener en cuenta que la duración de muchas actividades simples dentro de la estructura de procesos puede haber cambiado. Por ejemplo, si de forma interactiva se asigna un recurso de otro tipo o se añade una unidad más de algún otro para reducir la duración de la tarea. Por esta razón, se debe combinar la programación con el uso de las propiedades calculadas internamente por CATIA.

La solución definitiva adoptada ha sido un algoritmo que recorre únicamente las actividades simples dentro de la estructura de procesos. Para cada una, se crea un objeto de clase `ActivityObject` del tipo correspondiente, y se crean los objetos `ResourceObject` necesarios que representen todos los recursos que dicha actividad tenga asignados en la representación digital de la línea, también del tipo adecuado. Cuando para cada actividad simple todos los objetos relacionados han sido creados y relacionados, se calcula su duración llamando a la función para el cálculo del tiempo incluida en la clase `ActivityObject` (se llama `CalculateAttValue`, y debe tener como argumento "time"). Dicho valor se introduce explícitamente como valor de la propiedad tiempo del elemento que representa a cada actividad en el entorno. Ello hará que el sistema CATIA, de forma automática modifique el tiempo de las actividades padre a las que pertenezca cada actividad simple. Finalmente, se utiliza el valor del tiempo del nodo superior de la estructura de procesos, que se corresponderá con el tiempo de ciclo del nodo.

De la manera descrita, se obtiene siempre de manera precisa el tiempo de ciclo de la estructura de procesos de la línea representada, y que haya podido ser modificada interactivamente.

En cuanto a la incertidumbre en el tiempo, se calcula empleando los métodos programados que se utilizan en la etapa anterior. Dichos métodos tienen en cuenta las relaciones de precedencia previas a las posibles modificaciones interactivas realizadas, aunque utilizan los valores actualizados del tiempo de duración de las actividades simples. Aunque puede haber diferencias con el valor teórico exacto de la incertidumbre, las pruebas realizadas han encontrado que dichas diferencias, en los casos en que se producen, no son significativas, pues suponen un error de decenas de segundos respecto al valor teórico, cuando el tiempo de ciclo puede tener un valor de decenas de horas.

7.4.4.4.2 Cálculo de costes

La determinación de los costes de las actividades de la línea no es tan compleja como la de sus tiempos. Se basa en los principios de que los costes que se pueden imputar a una actividad vienen dados por la utilización de los recursos que tiene asignados (fundamental en el enfoque de costes basados en actividades), de que un mismo recurso se puede compartir por varias actividades de la línea y de que los recursos asignados lo están durante todo el tiempo de ciclo (lo cual está asociado a la hipótesis de línea síncrona).

Siguiendo las consideraciones anteriores, se ha programado el cálculo de costes empleando un bucle que recorre todos los recursos asignados a las actividades de la línea, en lugar de recorrer las actividades mismas. Para cada recurso, se obtiene su coste horario, teniendo en cuenta si se emplea en estaciones con turnos de trabajo extraordinarios, y se multiplica por el tiempo de ciclo del nodo calculado anteriormente. Dicho valor se suma para todos los recursos del nodo industrial y el resultado es el coste total.

Se debe tener en cuenta, que el coste calculado de la manera descrita está referido al tiempo de ciclo calculado para ese nodo, sin considerar en cuenta el auténtico tiempo de ciclo del proceso, que posiblemente difiera. Por ello, cuando en la evaluación final se utilice el coste de la línea de cada nodo, tras haber sido exportado, se efectuará una compensación que tenga en cuenta el tiempo de ciclo definitivo del proceso entero.

La incertidumbre en el coste se calcula principalmente empleando la incertidumbre calculada para el tiempo de ciclo del nodo industrial, y el coste horario de todos los recursos que se encuentran asignados. Se calcula dentro del mismo bucle que el coste, por sencillez en la programación.

7.4.4.4.3 Cálculo de la eficiencia en el uso de recursos

La eficiencia se calcula siguiendo la Ec. 5.5.28 del apartado 5.5.5. La fórmula, tras aplicar las simplificaciones que se explican en el apartado, es muy sencilla. Sin embargo, programar el cálculo resulta bastante más trabajoso. La razón es que se requiere, para todo recurso, el tiempo de duración de las actividades a las que está asignado. Esa asociación no se requiere para el cálculo de ningún otro atributo, por lo que ha sido necesario programar exclusivamente para éste un recorrido subordinado, que compruebe, para cada recurso, todas las actividades, y encuentre aquéllas a las que está asignado. Luego se calcula su tiempo de duración y se aplica la fórmula.

El cálculo de la incertidumbre de la eficiencia es también trabajoso. Se emplea la Ec. 5.5.42, ya de por sí compleja. Se requiere la incertidumbre del coste total, calculada para el atributo anterior, así como la incertidumbre del tiempo de duración de las actividades a las que está asignado cada recurso. Dado que dichas actividades se obtienen para el cálculo de la eficiencia, su incertidumbre se calculará dentro del mismo bucle. La incertidumbre de la duración de cada actividad simple se calcula al determinar la del tiempo de ciclo, por lo que en este punto basta con recuperar dicho valor, que se habrá almacenado en el objeto `MfgAttribute` correspondiente.

7.5 Bloque C: Definición de la Distribución en Planta

El Bloque C está dedicado a la definición de la distribución de los elementos de cada línea de montaje en el espacio disponible, o distribución en planta. Consiste en asignar unas posiciones estáticas a todos los elementos implicados en la línea de montaje. Muchos de dichos elementos se estarán moviendo por la planta durante cada ciclo, lo cual se deberá definir mediante el módulo de simulaciones en etapas de desarrollo del diseño del proceso de montaje posteriores a la aplicación de la metodología. En el bloque se busca obtener las posiciones extremas de los elementos, de forma que se pueda estimar la superficie requerida de forma efectiva, y tener una idea aproximada de la configuración final de la planta.

El Bloque C no tiene entradas propiamente dichas, sino que implica un cambio en el documento de representación de una determinada línea de montaje. Se parte de una representación de la línea en la que todos los elementos se encuentran posicionados en el origen del modelo de producto, y se debe obtener una distribución de ellos en el espacio en las posiciones extremas que ocuparán durante el proceso de montaje. Como salida del bloque se obtiene el valor de la superficie requerida de la planta que se seleccione para el nodo industrial.

Se debe tener en cuenta que el Bloque C está ideado para el posicionamiento de los elementos correspondientes en la línea de montaje. Se han programado varios comandos para facilitar esta tarea, pero gran parte del trabajo lo llevará a cabo el usuario empleando de forma interactiva las herramientas provistas en CATIA V5/DELMIA. Se considera, además que no tiene ningún sentido programar comandos que únicamente repliquen funciones ya cubiertas por uno o varios comandos existentes en CATIA sin aportar ninguna ventaja adicional.

La distribución en planta de cada línea de montaje, obtenida tras la ejecución del Bloque C, constituye una primera representación digital de dicha línea. Podrá ser el punto de partida para el desarrollo de la Maqueta Digital o iDMU del proceso. Conforme se vaya definiendo el proceso de montaje, en su alternativa seleccionada, según niveles de detalle mayores que el buscado en la metodología, se irán añadiendo elementos hasta alcanzar dicho concepto.

Para describir el Bloque C se comenzará directamente por las funcionalidades que se han incluido en el mismo, cuya implementación se detallará en la sección siguiente; por último se mostrará la interfaz definida para posibilitar el acceso a los comandos programados, junto con una explicación de los distintos controles que incluye.

7.5.1 Funcionalidades

En la siguiente sección se describen las funcionalidades que se incluyen en el Bloque C. Principalmente están orientadas a facilitar al usuario la definición de las posiciones de los distintos elementos de la línea de montaje dentro del espacio disponible de la planta. Se debe tener en cuenta que los comandos programados representan unas acciones concretas, y que será el usuario quien deba completar el posicionamiento empleando de forma interactiva las herramientas de CATIA. El Bloque C consiste en la definición de toda la distribución en planta, y las funcionalidades programadas únicamente facilitan parte de esta tarea.

7.5.1.1 Selección de todos los elementos asociados a una estación

Una de las funcionalidades que se incluye dentro del bloque es la selección automática de los elementos que estén asignados a la unión o a alguna de las operaciones que incluye, tanto productos como recursos. Ello facilita el posicionamiento de las estaciones en la planta, dado que evita tener que desplegar todas las actividades incluidas en una estación en el árbol para seleccionar uno a uno sus productos y recursos asignados. Si la herramienta compás del entorno está en modo posicionamiento, los elementos seleccionados se pueden desplazar y reposicionar con ella, mediante desplazamientos lineales o giros a partir de un eje.

Figura 87: posicionamiento simultáneo de los elementos de una estación en una línea de montaje.

Por tanto, el usuario puede establecer el compás en el modo correcto, seleccionar una estación y, de forma directa, desplazar simultáneamente todos sus elementos hasta la posición deseada. El paso siguiente consistiría en desplazar cada elemento individual hasta sus coordenadas finales desde el posicionamiento anterior. La Figura 87 muestra el desplazamiento simultáneo de los elementos asociados a una estación de la línea, empleando el compás (se visualiza como un arco y unos ejes de color verde) para un desplazamiento de izquierda a derecha en el plano horizontal. Como se puede observar en el árbol PPR, se ha seleccionado sólo ciertos elementos, en este caso los asociados con la estación.

7.5.1.2 Posicionamiento de las estaciones según un patrón

Otra funcionalidad del Bloque C consiste en posicionar, de manera automática, los elementos asociados a todas las estaciones de la línea, de forma que cada estación ocupe una posición dentro de un patrón. La funcionalidad persigue facilitar al usuario la tarea de distribuir las distintas estaciones en el espacio de la planta. El usuario debe especificar el valor de los parámetros que definan la red o patrón.

La idea general del uso de los comandos desarrollados para este bloque sería ejecutar el posicionamiento según un patrón, a partir de las posiciones obtenidas desplazar cada estación hasta el lugar que se desee, utilizando la funcionalidad de seleccionar todos los elementos relacionados y finalmente reposicionar cada elemento individual hasta el lugar deseado, mediante las herramientas de CATIA.

7.5.1.3 Determinación de la superficie requerida

Un aspecto considerado importante en la metodología es la superficie requerida para la línea de montaje de un nodo industrial, que debe ser menor que la disponible en la planta industrial asignada. El cálculo de dicha superficie, sin embargo, es complejo debido a que en una línea puede haber muchos elementos implicados, cada uno en una posición y con unas dimensiones distintas.

Figura 88: determinación de la superficie requerida mediante modificación del perfil del elemento "suelo".

Una posibilidad para la estimación de la superficie requerida sería la aproximación por planos paralelos hasta determinar un espacio mínimo necesario. Se trataría de comprobar si algún elemento tiene una intersección con planos paralelos que se van trazando, hasta determinar el prisma de menor volumen que contenga a todos los elementos de la línea. Sin embargo, la orientación inicial de los planos tiene demasiada influencia sobre el resultado obtenido.

Se ha desarrollado una alternativa diferente, consistente en que el usuario, de manera interactiva, modifique el perfil de un elemento de geometría plana, que se correspondería con el suelo de la planta, de forma que englobe todos los elementos deseados. Posteriormente, es posible extraer el valor de la superficie, a partir de las propiedades de dicho elemento. La Figura 88 muestra este proceso para una posible línea de montaje final con 4 estaciones, del producto empleado para el caso de estudio CU2.

7.5.2 Implementación

A continuación se detalla la manera seguida para implementar las funcionalidades descritas anteriormente. Se ha incluido los aspectos que han requerido un proceso más cuidadoso de programación o una solución cuya explicación no es obvia, o bien no implementan de manera rigurosa la funcionalidad, sino únicamente una aproximación de la misma que permite demostrar su viabilidad de cara a futuras versiones de la aplicación para ejecutar la metodología.

7.5.2.1 Posicionamiento de un elemento

El posicionamiento de un elemento dentro del espacio tridimensional en el entorno CATIA V5/DELMIA representa el paso básico de las funcionalidades incluidas en el Bloque C. La programación del posicionamiento de un elemento tiene cierta complejidad, debido a ciertas limitaciones de la automatización de CATIA.

El objeto que almacena la posición actual de un determinado elemento de tipo Producto pertenece a la clase Position, relacionada con la clase Product, del modelo de clases interno de CATIA. La clase Position incluye funciones para obtener y modificar la posición del elemento pero no se permite su acceso mediante programación en VBA. Si se emplea, sus métodos funcionan correctamente, pero no se puede declarar de forma explícita.

La posición de un elemento físico en el entorno se almacena mediante un “array” o vector de 12 componentes, donde las 9 primeras definen la orientación de los ejes X, Y y Z originales del elemento, y las 3 últimas recogen las coordenadas de su centro (que se definió al crear la geometría del elemento). Las funciones para obtener o modificar la posición emplean como argumentos datos sin un tipo específico, por lo que los arrays mencionados tampoco se pueden declarar como pertenecientes a ninguna clase

Por tanto, para el reposicionamiento de un elemento, representado por el objeto prodToPos, de clase Product, desplazándolo 1m a lo largo de su eje Y, se debería utilizar el código mostrado más abajo. Se emplearía el array posVector, con componentes numeradas del 0 al 11, para almacenar la posición del Product. Se le sumaría la cantidad de 1000 mm a la componente relativa a la coordenada Y del centro del elemento y se establecería el array modificado como la nueva posición del Product.

```
Dim posVector(11)
Dim elemPosition
Set elemPosition = prodToPos.Position
elemPosition.GetComponents posVector
posVector (10) = posVector (10) + 1000.0
elemPosition.SetComponents posVector
```

7.5.2.2 Posicionamiento de las estaciones según un patrón

Tras haber explicado la manera de implementar el posicionamiento de un elemento mediante código, se estima que la distribución de un conjunto de elementos según un patrón resulta evidente. Basta con realizar las mismas acciones para cada estación: obtener todos sus elementos relacionados y modificar sus posiciones para que se ajusten al patrón definido.

Al cargar en el documento de representación de la línea de montaje los elementos correspondientes a productos y recursos todos se posicionan por defecto haciendo coincidir su origen de coordenadas con el del documento de tipo Proceso. Por tanto, basta con desplazar desde ese punto los elementos de cada estación siguiendo las traslaciones necesarias para alcanzar su puesto en el patrón, que dependerá del puesto de la estación en la secuencia de montaje.

En el primer prototipo desarrollado para implementar la metodología, únicamente se ha incluido la posibilidad de un posicionamiento siguiendo un patrón rectangular, según las direcciones X e Y y de forma que cada estación tiene como estaciones vecinas a la anterior y la siguiente en la secuencia de montaje. De esa forma se demuestra que la idea es factible y resulta útil dentro de la metodología. Otros patrones serían también posibles, como con forma hexagonal o sencillamente siguiendo una línea recta.

7.5.2.3 Selección de elementos

La selección de un elemento mediante código es equivalente a que el usuario seleccione dicho elemento con el cursor en el entorno tridimensional, o bien en el árbol PPR. Se puede implementar utilizando el objeto de clase Selection asociado al objeto de clase Document que representa el documento correspondiente, mediante su función Add.

7.5.3 Interfaz

Las acciones asociadas a las funcionalidades que se han definido para el Bloque C se incluyen en una la interfaz que se muestra en la Figura 89. Dicha interfaz no almacena ninguna información de manera interna, por lo que puede cargarse en cualquier momento para utilizar los comandos que incluye. En la Figura 89 se explica la función de todos los elementos de la interfaz.

Figura 89: interfaz diseñada para el Bloque C.

7.6 Bloque D: Definición de la logística

El objetivo del Bloque D es la definición del plan logístico, en parte consistente en las localizaciones donde se ubicarán los nodos de la red de transportes que son los nodos industriales definidos y los puntos de los que partirán los componentes individuales del producto, que se pueden considerar centros de fabricación ajenos al proceso de montaje o zonas de entrega de proveedores. El otro aspecto del plan logístico son los transportes de productos para comunicar los nodos de la red. Para cada uno se debe definir el medio, su frecuencia y posibles escalas en el trayecto.

Esta definición se realiza de forma automática, primero el usuario tiene la posibilidad de fijar la localización de algunos de los nodos de la red y posteriormente se aplica un método meta heurístico de optimización discreta denominado Optimización por Colonia de Hormigas (ACO). Mediante dicho método se definen todos los aspectos enumerados anteriormente. En la sección 6.1 se explica de manera exhaustiva la inclusión del ACO en la metodología, como su justificación, ventajas respecto a otros métodos similares e implementación.

7.6.1 Entradas y requisitos

Para poder lanzar el Bloque D y definir la red logística es imprescindible disponer de la configuración de dicha red. Esto viene dado por los nodos industriales que se han definido para el proceso de montaje y el producto intermedio que cada uno tiene asociado. Los productos hijos de cada uno de dichos productos deberán transportarse hasta el nodo asociado, de la misma forma que ellos mismos habrán de ser transportados hasta el siguiente nodo industrial. La configuración de los nodos industriales del proceso viene determinada, a su vez, por la estructura de la vista As Planned. En consecuencia, se puede establecer que el principal requisito del Bloque D es la definición de la vista As Planned o, si se prefiere, la ejecución del Bloque A.

También es cierto que hay más información que se requiere en el proceso de definición automática de la logística. Por ejemplo, el tiempo de ciclo del proceso será una limitación ineludible para determinar el transporte entre localizaciones de la red. El espacio requerido para la línea de montaje de cada nodo industrial es necesario para determinar cuáles de las plantas disponibles son aptas para dicho nodo.

De la misma forma, conocer el coste de las horas de trabajo de los recursos humanos asignados a los procesos de montaje de cada nodo se requiere para estimar el impacto de ubicar dicho nodo en un país o en otro, dadas las diferencias en el nivel de salarios.

Esta información queda determinada, para cada nodo industrial, al completar el Bloque B (y seguidamente el Bloque C, para determinar la superficie requerida). Sin embargo, no se considera esto un requisito, puesto que se ha programado el sistema de forma que, si la línea de un nodo industrial aún no ha sido completamente definida, se toman unos valores por defecto para su coste y espacio requerido; el tiempo de ciclo se determina como el mayor de entre los nodos definidos, y si aún no hay ninguno, se emplea el valor denominado tiempo de ciclo objetivo, que es un parámetro inicial del sistema. La ejecución del Bloque B y del C con anterioridad a la definición de la logística no es obligatoria, y tiene también inconvenientes: por ejemplo, implica evaluar unos costes sin tener en cuenta los salarios finales, que dependerán del país en que se ubique la línea; o diseñar una distribución en planta de la línea de montaje sin conocer el límite de superficie que puede ocupar o la altura máxima de la planta.

En cuanto a entradas del bloque, una de las principales será, como resulta evidente, la información logística. Como se explica en las secciones 5.3.2, 5.4 y 7.2, la información logística forma parte de las condiciones iniciales del problema, y está compuesta por el conjunto de plantas industriales disponibles, con los atributos que las definen como recursos y otros específicos, incluyendo su localización, coste de su utilización o superficie disponible; el conjunto de medios de transporte posibles, definidos de manera análoga y unas tablas con tiempos y distancias entre las localizaciones según cada medio de transporte.

7.6.2 Salidas

La principal salida del bloque es una red logística totalmente definida según los términos que se consideran en su modelización, descritos en la sección 5.4. Dicha solución será cercana a la óptima gracias al método matemático implementado para su búsqueda. Dicho método es el denominado ACO, de tipo meta heurístico, y se describe en la sección 6.1.

La red logística resultante estará definida en cuanto a la información que la caracteriza, no está representada de ninguna forma en el entorno CAM, únicamente mediante el valor de los atributos que la definen. Así, las actividades que representan a los nodos industriales en el documento principal, tendrán un atributo denominado “Location” cuyo valor será la localización de la planta industrial que se ha seleccionado para su ubicación; un atributo “Number of stops”, que recogerá el número de escalas y otro “Transport means”, con los medios seleccionados. La información de la red definida se incluye en un archivo Excel que se crea con cada ejecución del bloque.

Además, la solución elegida para la red logística se evalúa en términos de coste, y se asocia a cada nodo industrial la parte que se le puede imputar, como valor del atributo “Transport cost”. Este valor incluye el coste de utilización de la planta asociada al nodo durante un ciclo, así como el coste de todos los transportes que tienen dicho nodo por destino, ajustado según la frecuencia de cada trayecto. De esta forma, al tener que evaluar la solución global al proceso de montaje, no es necesario calcular de nuevo los parámetros relacionados con la red de transportes.

7.6.3 Funcionalidades

En esta sección se describen las principales funcionalidades del Bloque D. La principal de ellas será la optimización automática de la definición de la red logística, pero el bloque incluye otras, como la fijación de algunas localizaciones antes de lanzar el ACO y la exportación de los resultados al documento general de representación de la solución.

7.6.3.1 Optimización de la red logística

La principal funcionalidad incluida dentro del bloque es la ejecución de un algoritmo de optimización según el método meta heurístico de ACO. Dicho método consiste en la generación de un número elevado de soluciones, donde cada solución se define mediante la toma de un número de decisiones de manera similar al comportamiento de una hormiga en la naturaleza: para una decisión concreta, se elige una de las opciones disponibles según un criterio que incluye una componente de aleatoriedad y una componente basada en la puntuación total que obtuvieron las otras soluciones (u hormigas) que se definieron eligiendo las distintas opciones.

Se ha recurrido a un método de carácter meta heurístico porque en el momento de la toma de decisiones que conducen a una solución completa, aún no se conoce los resultados finales que se obtendrán. Éstos únicamente se conocerán cuando la solución esté completa y se pueda evaluar. En la sección 6.1.2 se justifica con más detalle la elección de un método meta heurístico y, específicamente, el método ACO.

7.6.3.2 Fijación de localizaciones

Cabe la posibilidad de que para la definición del proceso de montaje en un caso concreto, algunas de las localizaciones de la red logística ya vengan determinadas por motivos ajenos a la optimización. Para esas situaciones, se ha incluido la posibilidad de fijar las localizaciones de los nodos de la red que se desee, con anterioridad a lanzar el algoritmo de optimización.

Tras inicializarse la información que se usará en la optimización, se muestra una interfaz en la que aparecen todos los nodos de la red, de tipo “Nodo industrial” u “Origen” y, al seleccionar uno de ellos, se muestran las localizaciones que se consideran factibles para él. El usuario, entonces, puede fijar una localización concreta para dicho nodo, o bien vetar una de las localizaciones disponibles. En cuanto a los transportes, son elegidos de manera automática por el sistema.

7.6.3.3 Exportación de los resultados

La última funcionalidad que incluye el bloque es la exportación de la información de la mejor solución encontrada para la red logística. La información completa se escribe en un archivo de tipo Excel que se guarda en la dirección que el usuario especifique. Esto incluye las localizaciones de los nodos de la red, los medios de transportes y escalas para todos los trayectos necesarios, el número de productos que se transporta simultáneamente en cada uno, la frecuencia de cada viaje y el coste asociado.

Parte de la información descrita se asocia a los nodos industriales representados en el documento general. A cada uno se le añade el atributo “Transport cost”, cuyo valor será la suma del coste de todos los movimientos que lo tienen como destino. Además, cada nodo también tiene un atributo denominado “Location”, donde se almacenará su localización.

7.6.4 Implementación

El método ACO se ha implementado en el lenguaje VBA según lo descrito en la sección 6.1.4. Se han desarrollado diversas subrutinas para la generación de las decisiones que conducen a una solución completa, su ordenación según la importancia en los resultados y la propia generación de soluciones. Todo ello se incluye en la sección mencionada.

También ha sido necesario utilizar un conjunto de objetos que facilitaran la gestión de toda la información, pues es compleja. Algunas de las clases de dichos objetos se incluyen en el meta modelo general, dado que se consideran parte de la definición del modelo logístico, que forma parte del proceso de montaje. Otras clases no se han incluido pues se consideran propias de la implementación del método ACO.

Figura 90: clases definidas para la implementación del ACO, junto con sus relaciones con otras del meta modelo.

La Figura 90 muestra las clases mencionadas. Las que no están incluidas en el meta modelo son la clase ACO_Ant y ACO_Option, que se han resaltado en amarillo en la figura. Cada solución generada para la red está representada por un objeto de la clase ACO_Ant, que funciona como una hormiga en el algoritmo. Por otro lado, la red se define mediante un conjunto de nodos, correspondientes con los puntos destino u origen de los transportes necesarios, que se representan mediante objetos de la clase TransportNode, y pueden corresponder a un nodo industrial o únicamente al punto desde donde parten los componentes individuales.

Las decisiones que se deben tomar para generar una solución se asocian con la clase ACO_Node. Cada objeto TransportNode estará relacionado con dos ACO_Node, pues se le deberá asignar tanto una localización como un transporte hasta el siguiente TransportNode. Cada objeto ACO_Node tendrá un número de opciones disponibles de plantas o transportes, según su carácter.

Las opciones relativas a la elección de la planta estarán asociadas a recursos, u objetos ResourceObject que representan la planta industrial. Se genera uno por cada planta existente, que se representaría con un objeto ResourceModel. Los atributos fijos de la planta, como su altura mínima se obtienen del ResourceModel, mientras que otros que varían durante la generación de una solución, como la superficie libre disponible, se asocian al ResourceObject. Se debe tener en cuenta que la superficie disponible de una planta se ve modificada si se ubica en ella la línea de un nodo industrial, dado que se permite ubicar las líneas de varios en la misma planta.

Las opciones relativas al transporte hasta el siguiente nodo, se asocian a objetos ActivityObject, que representan el transporte mismo de componentes. Cada actividad de transporte tendrá asignado como recurso un medio de transporte, representado también como ResourceObject. Los distintos medios de transporte disponibles se representan mediante objetos de clase ResourceModel.

Durante la ejecución del algoritmo, cada “hormiga” ACO_Ant recorre todos los ACO_Node existentes en la red y elige una de las opciones ACO_Options, con una cierta componente de aleatoriedad y también teniendo en cuenta la puntuación global obtenida por soluciones que se definieron eligiendo esa misma opción. Al generarse cada solución, se evalúa, y se actualiza el sistema con los resultados.

7.6.5 Interfaz

A continuación se muestra la interfaz definida para el primer paso del Bloque D. Consiste, como se ha comentado, en la determinación previa por parte del usuario de la localización de nodos de la red, o bien en el descarte de localizaciones.

Nodes list

La lista muestra todos los nodos de la red logística, y especifica si se trata de tipo "Origin" o "Logistic node" (nodo industrial).

Select

El comando fija la localización seleccionada de la lista Available plants list para el nodo seleccionado de la Nodes list.

Selected

Muestra la localización fijada para el nodo seleccionado en la Nodes list, en caso de haberla.

Recover

Se elimina todas las localizaciones fijadas o descartadas.

Cancel

Cancela la ejecución del bloque y cierra la interfaz.

Available plants list

La lista muestra las localizaciones disponibles para el nodo seleccionado de la Nodes list.

Discard

El comando descarta localización seleccionada de la lista Available plants list como elección para el nodo seleccionado de la Nodes list.

Discarded

Muestra las localizaciones descartadas para el nodo seleccionado en la Nodes list, en caso de haberlas.

Go

Lanza el algoritmo de optimización con las restricciones fijadas.

Figura 91: interfaz para la definición de localizaciones previamente a la ejecución del método ACO.

7.7 Bloque E: Evaluación

El último bloque incluido en la metodología tiene como objetivo principal la evaluación de la solución actual para el diseño conceptual del proceso de montaje. Esto permite tanto la comparación de la solución con otras alternativas como la obtención de información que ayude al usuario a valorarla.

El sistema desarrollado para evaluar cada solución se basa en la teoría de la Lógica Borrosa (Fuzzy Logic, FL). Este tipo de lógica se basa en la idea de que un elemento puede pertenecer a un conjunto con un grado, distinto al valor booleano de la lógica tradicional. Los fundamentos de la teoría de FL, así como la explicación detallada de la implementación de la misma en la aplicación, se incluyen en el apartado 6.2.

El bloque no tiene asociada ninguna interfaz, tras la ejecución del comando que lo lanza, ejecuta todas las acciones que incluye de forma automática, y almacena los resultados obtenidos como propiedades dentro del documento de representación de la solución, tras mostrar por pantalla la puntuación obtenida.

7.7.1 Entradas y requisitos

La principal entrada de información será una solución para el diseño conceptual del proceso de montaje con un nivel de definición suficiente. Para que una determinada solución se evalúe de manera correcta, debe estar en un estado de definición tal que se haya ejecutado para ella el Bloque D (definición de la logística) al menos una vez, y el Bloque B y el C para todos los nodos industriales. De esa forma se conoce, en el momento de la evaluación, el coste asociado a los transportes para cada nodo, el coste asociado a los procesos que incluye, la superficie que requiere, el tiempo de ciclo del proceso y las eficiencias en el uso de los recursos ponderadas para cada nodo.

También es posible, sin embargo, ejecutar el Bloque E cuando la solución no está enteramente definida según los criterios descritos. En esos casos, el sistema tomará como nulos muchos de los valores de parámetros del sistema aún no definidos, mientras que para otros se emplearán valores por defecto. La ejecución del bloque en esos casos tendrá como utilidad únicamente la estimación de algunas propiedades de la solución en ese estado intermedio, para valorar, por ejemplo, si se está optando por una alternativa que va a resultar muy costosa. La utilización del sistema basado en FL no tendría sentido, ya que la valoración se haría en función de criterios pensados para soluciones completas.

Por lo tanto, el requisito ineludible para la ejecución del bloque sería que se hubiera definido la estructura de nodos industriales del proceso, es decir, que se hubiera ejecutado el Bloque A. Sin embargo, para que la evaluación sea efectiva, ese estado de definición de las soluciones no es suficiente. En la metodología se ha impuesto que, como mínimo, se haya completado la definición de la línea de montaje para un nodo. Ése es el momento en el que se cambia al último estado de definición de una solución, en el que el comando para lanzar el Bloque E se encuentra disponible en la interfaz general.

La información de entrada para el bloque, proveniente de las características de cada solución, estará almacenada en el documento de representación de la misma, como propiedades de los elementos de la parte de procesos del árbol PPR que representan a los nodos industriales. Al iniciar el bloque basta con leer esta información, no se debe repetir los cálculos para su obtención.

También se puede considerar información de entrada al conjunto de reglas que componen el motor de inferencia del sistema de evaluación basado en FL. Dichas reglas controlan el funcionamiento del sistema y determinarán el resultado final obtenido. En la primera

implementación de la metodología realizada, se incluyen dichas reglas ya en el sistema, por lo que también se puede considerar como parte de la programación del bloque.

7.7.2 Salidas

Se puede hablar de dos salidas distintas para el Bloque E. La primera de ellas será el resultado numérico de la valoración de la alternativa, una puntuación entre 0 y 10 según los valores calculados de parámetros relacionados con el tiempo, los costes y la eficiencia en el uso de los recursos. Dicha puntuación se considera una forma de distinguir entre varias alternativas de diseños del proceso de montaje.

La otra salida del sistema vendrá dada por las propiedades finales de la solución calculadas al evaluarla, relativas al coste de la misma, el tiempo o la eficiencia del uso de recursos.. Las propiedades que se calculan se enumeran a continuación:

▪ tiempo de ciclo (h de trabajo)	▪ Coste de transporte (€)
▪ tiempo de ciclo (h reales)	▪ Eficiencia total ponderada
▪ tiempo de entrega (h)	▪ Incertidumbre del tiempo de entrega
▪ Incertidumbre del tiempo de entrega (h)	▪ Incertidumbre del coste total
▪ Coste total (€)	▪ Incertidumbre de la eficiencia

Los valores se almacenan dentro del nodo de procesos principal del documento de representación de la solución

7.7.1 Requerimientos de la etapa

El sistema de evaluación, tenía que cumplir varios requisitos para su inclusión dentro de la metodología. Los sistemas basados en la FL se estimaron muy adecuados para ello, por lo que se seleccionó esta disciplina como base para el sistema. Los requisitos mencionados se describen a continuación.

En primer lugar, debía tratarse de un sistema multicriterio, es decir, que permitiera obtener una valoración final partiendo de varios parámetros de entrada.

Además, el sistema debía tener en cuenta la incertidumbre asociada a los valores de los parámetros. Para ello, la FL está especialmente recomendada [73]. Adicionalmente, se ideó una manera de incluir los valores de la incertidumbre de manera explícita junto con los valores de entrada.

Otro requisito consistía en que el funcionamiento interno del sistema tenía que evitar que se produjesen puntuaciones idénticas entre soluciones similares, puesto que uno de los objetivos de la evaluación era comparar alternativas y determinar la más adecuada.

7.7.2 Funcionalidades

En esta sección se describen las funcionalidades que cubre el Bloque E de la metodología. Parece obvio que la principal funcionalidad será la de evaluar una determinada solución pero, como explica, se puede desglosar en dos: la obtención de una puntuación para comparar alternativas y la determinación de las propiedades finales de la solución.

7.7.2.1 Evaluación basada en FL

La funcionalidad principal que se incluye en el bloque es la posibilidad de evaluar una solución completa aplicando la Lógica Borrosa. El resultado de ello será una puntuación que permitirá determinar entre varias alternativas cuál representa la mejor configuración para el proceso de montaje del producto.

Básicamente se trata de obtener valoraciones cualitativas de distintos aspectos de una solución. Se valora el tiempo, empleando como indicador el tiempo de entrega de una unidad; el coste, cuyo indicador es el coste de producir una unidad y la eficiencia media ponderada del uso de los recursos asignados. Cada valor tendrá un grado de pertenencia a unos conjuntos borrosos definidos para el rango de valores contemplados para cada indicador. Cada conjunto borroso estará asociado a una calificación, como “Malo” o “Excelente”.

Para determinar la pertenencia de un valor a un conjunto borroso, se tiene en cuenta el valor de la incertidumbre asociada a dicho valor. Se calcula la integral de los posibles valores según la distribución probabilística, multiplicados por la pertenencia al conjunto que tendría cada uno.

Según las combinaciones de pertenencias de los parámetros valorados a los conjuntos borrosos definidos, se activarán en mayor o menor medida un conjunto de reglas que componen el núcleo de conocimiento del sistema, denominado motor de inferencia. Las reglas son de carácter booleano, pero su grado de activación será un valor real, dependiente del grado de cumplimiento de sus proposiciones, lo que en la práctica para la implementación realizada corresponde a la pertenencia a los conjuntos implicados en cada regla, concretamente al menor valor de pertenencia.

Por ejemplo si la regla establece: “**SI** el Coste es Excelente, el Tiempo es Bueno y la Eficiencia es Regular **ENTONCES** la puntuación será 6” y los valores de pertenencia de costes, tiempos y eficiencia a los conjuntos “Excelente”, “Bueno” y “Regular” son de 0.26, 0.51 y 0.19, respectivamente; entonces dicha regla se activará con un grado de 0.19, pues es el mínimo valor de cumplimiento.

Cada regla está asociada a un conjunto borroso de salida, y la pertenencia al mismo de la puntuación vendrá dada por el máximo nivel de activación de dicha regla obtenido. Si se representa el área resultante de la unión de los perfiles de los conjuntos activados limitados por su nivel de pertenencia, se obtendrá una figura que representa la densidad de pertenencia de la puntuación final a cada valor de la escala. Por tanto, el valor final se obtendrá calculando la posición en dicha escala del centro de gravedad de la figura, dado que se ha seguido dicho método.

El método completo, así como la justificación de su elección y de la definición de las variantes que se han seguido, se explica detalladamente en la sección 6.2.

7.7.2.2 Cálculo de propiedades de la solución

La otra funcionalidad del Bloque E es el cálculo del valor de distintas propiedades de una solución. Además de su utilidad para comprar soluciones, dichos valores también son relevantes en sí mismos, pues aportan mucha información acerca de una solución. Además, es posible que entre dos soluciones que obtengan puntuaciones similares, el usuario desee comprobar el valor concreto de costes, tiempos y eficiencia de cada una, en lugar de confiar a ciegas en los resultados de la evaluación borrosa.

Por otra parte, una característica de los modelos en los que se basa la metodología es que tienen en cuenta la reducción de tiempos de duración de las tareas debida al aprendizaje, lo cual tiene cierto impacto sobre los tiempos y costes del proceso según el número de unidades que se hayan producido. La variación de dichos valores se puede estimar realizando evaluaciones, mediante el Bloque E, para distintos valores del número de ciclo actual. En el segundo caso de estudio, en la sección 9.2.5.1, se ha estudiado los efectos de variar el número de ciclo actual sobre los parámetros del sistema.

7.7.3 Implementación del sistema de evaluación

La sección recoge la manera seguida para implementar el sistema de evaluación basado en FL, en un documento Excel, así como la programación de los cálculos necesarios.

7.7.3.1 Sistema de evaluación basado en la Lógica Borrosa

Todo el sistema de evaluación se ha implementado empleando la aplicación Excel de Microsoft Office. Todas las reglas, funciones de pertenencia de los distintos conjuntos borrosos y el método de desborrosificación, o cálculo del valor final de la puntuación a partir de su pertenencia a los conjuntos de salida, se han implementado en un documento Excel.

La determinación de la pertenencia de cada parámetro de entrada a sus conjuntos borrosos asociados se realiza en una pestaña distinta. En una cuarta pestaña se determina el grado de activación de las distintas reglas, la pertenencia a los conjuntos de salida y el valor final de la puntuación de la solución.

El grado de pertenencia de cada valor a los conjuntos borrosos de entrada, teniendo en cuenta su incertidumbre, se calcula utilizando la Ec. 6.2.19. La determinación del valor final resultante a partir del perfil compuesto de pertenencia a los conjuntos de salida se realiza según la Ec. 6.2.21. Las reglas del motor de inferencia cubren todas las posibles combinaciones de calificaciones de los parámetros de entrada, es decir, hay 125 reglas (5 calificaciones o conjuntos para los 3 parámetros). Dichas reglas se recogen en la sección 0 de los Anexos.

Al ejecutar el comando que lanza el Bloque E y tras calcular los valores finales de los parámetros de entrada, de forma automática se abre el archivo de Excel que contiene todas las fórmulas, funciones de pertenencia y reglas del sistema basado en FL. El sistema introduce en las celdas adecuadas los valores centrales de dichos parámetros, así como su incertidumbre asociada, y obtiene el valor final de la puntuación de la solución de la celda destinada a ello.

Con esta forma de implementación, se evita que el sistema realice un número elevado de cálculos, que en el entorno VBA puede implicar tiempos muy alargados. Sería posible la utilización de otra aplicación distinta de Excel, como por ejemplo algún programa orientado específicamente a los cálculos matemáticos como Matlab, pero se estimó que Excel cubría todas las necesidades y sus funciones básicas se podían automatizar fácilmente y ejecutarse desde una sesión VBA. El estudio de otras posibilidades de implementación del sistema evaluador basado en FL queda como desarrollos futuros.

7.7.3.2 Cálculo de propiedades de la solución

El cálculo de las propiedades finales de evaluación de una solución se efectúan siguiendo las ecuaciones de la sección 5.5.5. Sin embargo, la forma en la que se realiza algunos cálculos intermedios durante la aplicación de la metodología, incrementa la complejidad en este aspecto. Como se comenta en la sección 7.4.4.4, al ejecutar la evaluación local de cada nodo industrial, se determina un tiempo de ciclo que no se corresponde con el del proceso completo, únicamente tiene en cuenta a dicho nodo.

Por tanto, para realizar los cálculos de costes y de eficiencias en la valoración local de cada nodo, se tuvo en cuenta un tiempo de ciclo que posiblemente difería del tiempo de ciclo del proceso. Para solventar este problema, se realiza una compensación en los cálculos de los valores finales de la solución: básicamente se divide el valor anterior asociado al nodo entre el tiempo de ciclo que se empleó y se multiplica por el tiempo de ciclo definitivo del proceso.

La implementación del cálculo de parámetros del sistema se detalla en la sección 8.2.2.3.1 del capítulo siguiente. El resto de cálculos requeridos para evaluar una solución se realizan según las ecuaciones expuestas en la sección 5.5.5.

Capítulo 8

Implementación

En los capítulos anteriores se ha detallado los modelos creados para dar soporte a la metodología y los métodos definidos para su funcionamiento, así como la propia metodología desarrollada. Para demostrar la factibilidad de todo ello, se requiere que sea aplicado, para lo cual se hace necesaria su implementación. Este capítulo se centra en ello.

Para la implementación de la metodología, se ha desarrollado una aplicación prototipo, que incluye todos los bloques definidos y permite generar soluciones conceptuales del proceso de montaje, y evaluarlas. La codificación interna de las partes del prototipo correspondientes a las distintas etapas del procedimiento se han construido a partir de los algoritmos diseñados, mostrados en los capítulos Capítulo 6 y Capítulo 7. También se ha requerido un trabajo de programación de funciones auxiliares y automatización de procesos.

Figura 92: entorno de desarrollo para la implementación de la metodología.

Como soporte principal para plasmar las soluciones de montaje que se definen, se ha empleado la herramienta CATIA V5/DELMIA, y el prototipo se ha construido utilizando la automatización VBA que incluye. Se ha creado un proyecto VBA que permite lanzar la metodología y ejecutar la mayoría de las funcionalidades que incluye. La Figura 92 muestra el entorno de desarrollo para la programación de proyectos VBA. Este tipo de automatización permite la creación de cuadros de diálogo, con los que es posible implementar las interfaces diseñadas; clases de objetos, lo que permite implementar los modelos en los que se apoya la metodología y funciones y subrutinas, que se pueden emplear para la implementación de los procedimientos definidos.

La manera de representar una determinada solución del proceso de montaje también es un aspecto importante de la implementación. Como se ha comentado, se emplea la herramienta CATIA V5/DELMIA, y cada diseño conceptual del proceso de montaje estará representado en dicho entorno virtual, incluyendo tanto la solución general como la representación digital de las líneas de montaje implicadas.

Para que sea posible la representación de los elementos de una solución, se requiere disponer de los modelos digitales de los productos y recursos que incluye. Si bien no son estrictamente necesarios para la programación de los módulos que componen el prototipo, sí son imprescindibles para la realización de pruebas de su funcionamiento, además de para la ejecución de los casos de estudio posteriores, evidentemente. Por esa razón, para completar la implementación ha sido necesario diseñar modelos CAD que representen a dichos elementos.

El capítulo incluye una descripción de la manera seguida para implementar los modelos en los que se basa la metodología, la explicación de los aspectos más importantes en la programación de la aplicación prototipo, el planteamiento de la forma de representar cada solución en el entorno y un repaso de los principales modelos digitales de productos y recursos diseñados.

8.1 Modelos

La metodología está basada en varios modelos, un modelo general, denominado meta modelo, que incluye, entre otras, clases que representan a tipos de actividades y recursos, y un modelo específico, el PRD, por cada producto para el que se pretenda diseñar el proceso de montaje. La utilización de la metodología también requiere cierta información de partida, principalmente acerca de las condiciones logísticas. La configuración de dichos modelos se ha explicado de manera detallada en capítulos previos de esta tesis.

Para el desarrollo de una aplicación que implemente toda la metodología será necesario, por tanto, implementar también los modelos sobre los que se apoya. En este primer apartado se describirá cómo se han programado las distintas clases que componen el meta modelo, así como la manera de importar la información de un PRD y la relacionada con la logística.

8.1.1 Meta modelo

Las clases del meta modelo se han implementado dentro del entorno VBA asociado a la aplicación CATIA V5. Se han incluido dentro del mismo proyecto que contiene los módulos de funciones y sub rutinas y formularios de usuario (interfaces) desarrollados para implementar la aplicación. De esa forma, es posible instanciar las clases del modelo desde dichos sub programas. Si fuese necesario, se podría exportar los módulos de clases y emplearlos en otros proyectos VBA, por ejemplo para el desarrollo de nuevos prototipos de la aplicación.

Figura 93: correspondencia entre el diseño de 3 clases y la implementación de los mismos y sus relaciones.

En el entorno de desarrollo de proyectos VBA, la definición de una nueva clase requiere la utilización de un módulo independiente. La Figura 93 muestra las clases ResourceObject, ResourceType y ResourceModel, representadas en lenguaje UML a la izquierda y en su implementación dentro del proyecto de desarrollo, a la derecha. Las correspondencias entre el diagrama de diseño de cada clase y el módulo en que se programó aparecen en color azul. Como se puede observar, diagrama e implementación contienen los mismos campos.

Las relaciones entre clases se han implementado como nuevos campos: por ejemplo, el campo ResType de la clase ResourceObject es un objeto de la clase ResourceType, y representa la relación entre dichas clases que en el diagrama UML se ha representado mediante el enlace titulado "ResType". Como se puede observar, la clase ResourceModel puede tener varios objetos ResourceType asociados (multiplicidad "1..*" en UML). Por eso, su campo correspondiente se ha definido como un Array (conjunto) de uno o varios elementos, al tener paréntesis.

8.1.2 PRD

En cuanto a los modelos de actividades y recursos, específicos para cada caso particular de montaje de un producto, para el primer prototipo se ha establecido que se definan empleando archivos Excel. Concretamente se empleará un archivo para la parte de procesos, con una pestaña para los tipos de actividades compuestas, otra para los tipos simples y otra para la tabla de duraciones e incertidumbres de estas últimas según datos empíricos.

La parte del diccionario PRD correspondiente a los recursos debe estar definida en un documento de Excel distinto al de los procesos. En este caso, los tipos de recursos estarán recogidos en una primera pestaña, las posibles especialidades de los recursos humanos se encontrarán definidos en otra y los modelos concretos del resto de recursos en otra distinta.

El acceso y gestión en general de la información del PRD ha sido un aspecto al que se ha dedicado cierto tiempo. La creación de un nuevo PRD no es una acción soportada por el primer prototipo implementado. Debe asociarse los archivos correspondientes a un PRD existente y definido de manera coherente. Para seleccionar el archivo adecuado dentro del disco, se ha empleado la función incluida en las aplicaciones compatibles con Microsoft, que permite una exploración interactiva del sistema, visualizando los archivos con la extensión especificada.

Cuando se asocia a una solución un PRD existente, la ruta donde están almacenados los archivos de Excel donde está definido se vinculan añadiendo un hipervínculo a los mismos, en el árbol PPR del documento de representación general de la solución.

Tanto en la ocasión en que se selecciona los archivos Excel del PRD como en futuras utilizaciones de la aplicación para la misma solución, se deberá ejecutar un proceso de lectura de la información específica de procesos y recursos. Ello se debe a que los objetos creados de las distintas clases no se almacenan, únicamente se conservan durante una misma sesión. Así, al comenzar cada ejecución de la aplicación, se requiere un tiempo (del orden de unos segundos) en el que se lee la información del PRD y se crean los objetos correspondientes.

Como se describe en la sección 7.2.3.3, la lectura de la información del PRD y la generación de los objetos requeridos para gestionarla es una acción compleja. El modelo de clases determina que un objeto que representa un tipo de actividad (de clase `ActivityType`) tendrá asociados objetos que representen a sus actividades hijas (de clase `ActivityObject`). Para poder generar un objeto de clase `ActivityObject`, primero se ha debido crear el `ActivityType` que corresponde a su tipo, pues la función para crear al primero pertenece a la clase de este último. Por ejemplo, si el tipo de actividad “Ensamblar” contiene una actividad hija “Remachar” de tipo “Ejecutar remachado”, al crear el objeto correspondiente al tipo, habrá que crear el objeto correspondiente a dicha actividad hija, para lo cual será necesario haber creado previamente el objeto que represente al tipo de esta: otro objeto `ActivityType` con nombre “Ejecutar remachado” y con los atributos correspondientes.

Se da la misma circunstancia con los recursos asignados a las actividades. Al crear el objeto de un tipo de actividad del PRD, además de sus actividades hijas, se deberá crear los objetos correspondientes a sus recursos asignados (de clase `ResourceObject`), pero para crear el objeto que represente a un recurso es necesario que se haya creado previamente el objeto que represente a su tipo (de clase `ResourceType`). Al crear los objetos correspondientes a los modelos de recursos y las especializaciones de recursos humanos ocurre algo similar. Cada modelo está relacionado con uno o varios tipos de recurso, por lo que los objetos que los representen deben haberse creado antes de poder crear al que represente al modelo. De la misma forma, antes de crear un objeto que represente una especialización se debe haber creado al objeto `ResourceType` que representa al tipo “Trabajador”.

En consecuencia, se debe crear los objetos siguiendo un orden concreto. Primero se crearán los objetos que representen a los tipos de recursos, luego se podrá crear los objetos que representen a los modelos de recursos y a las especialidades de trabajadores. El siguiente paso será crear los objetos relativos a los tipos de actividades que no tienen actividades hijas. Por último, se crearán los correspondientes a los tipos de actividades compuestas (con hijas), y en un orden tal, que no se cree en ningún caso un objeto de tipo de actividad que requiera la creación de un objeto de otra actividad compuesta cuyo tipo aún no se haya creado. El cumplimiento de esta última consideración se puede imponer en el código, pero en el primer prototipo de implementación desarrollado no incluye este aspecto, sino que (para los casos prácticos) se ha definido directamente la parte del PRD relativa a los tipos de actividades compuestas según un orden válido.

Todo lo descrito en el apartado es válido para el primer prototipo desarrollado, pero como desarrollos futuros se propone incluir mejoras que faciliten la asociación de condiciones iniciales. Por ejemplo, se podría crear un nuevo paso de la aplicación en el que se diera asistencia a la creación de nuevos tipos de actividades o recursos.

Otro aspecto relativo al PRD que se puede mejorar en futuras implementaciones es el medio en el que viene definido. En este primer prototipo se emplean documentos Excel que incluyen toda la información, pero podría ser interesante definir esa misma información empleando bibliotecas de actividades y recursos, cuya creación y edición es una funcionalidad incluida en CATIA V5.

Dicha opción se valoró al realizar la implementación, pero los equipos disponibles no disponían de las licencias adecuadas para acceder a todas las funciones de ese módulo de CATIA. Asimismo, también podría ser interesante la utilización de algún tipo de base de datos o sistema que permitiese almacenar objetos concretos entre distintas sesiones.

8.1.3 Información Logística

Se considera información logística a la parte de la contenida en las condiciones iniciales que tiene relación directa con la red de transportes de componentes entre los distintos nodos industriales entre los que se distribuya el montaje. Como se explica en la sección 5.3.2, esta información se compone de la matriz con tiempos, distancias, e incertidumbres para los trayectos posibles entre las localizaciones disponibles para un proyecto de montaje; así como las características de cada medio de transporte, como velocidad, consumo o coste del servicio y datos de las plantas industriales de las localizaciones disponibles, como superficie disponible, altura máxima permitida o su coste de utilización.

En esta primera implementación, la información logística se ha incluido en distintas partes de los archivos Excel que también recogen el diccionario PRD. Se ha considerado adecuado incluir la matriz de tiempos y distancias en el documento relativo a los tipos de actividades, dado que éste ya incluye datos empíricos para calcular el tiempo de duración de las actividades simples, y se puede considerar que cada trayecto es también una actividad, que requiere otro tipo de datos para calcular su duración.

Las características de medios de transporte y plantas industriales disponibles se incluyen en los documentos relativos a los tipos de recursos y modelos. En realidad, cada medio de transporte y planta industrial se ha definido como un modelo de recurso más, de los tipos "Transport mean" e "Industrial plant", respectivamente. Estos dos tipos también se han incluido en el PRD, en la sección correspondiente.

La gestión de la información logística relativa a tiempos y distancias entre localizaciones no se puede llevar a cabo mediante la creación de objetos de las clases contenidas en el meta modelo. Si bien las características de plantas y medios de transporte se pueden asociar a objetos de clase ResourceObject, la forma de calcular la distancia entre dos puntos no se puede asociar a ninguna clase. Para ello se definió una nueva clase, llamada LogisticInfo, que permitía almacenar en sus campos la información requerida. Dicha clase no se ha incluido en el meta modelo porque no se considera que represente un auténtico elemento implicado en el proceso de montaje, sencillamente es una clase que permite gestionar la información necesaria para aplicar unas reglas, principalmente cálculo de tiempos y costes asociados al transporte.

La Figura 94 muestra la clase LogisticInfo definida para almacenar la información logística. Entre sus campos se incluye una lista de las denominaciones de todas las localizaciones disponibles, una matriz distinta asociada a tiempos o distancias según cada medio de transporte y el valor de la incertidumbre que se tiene en cuenta para cada uno. Los campos "TruckSpeed" y "AirSpeed" contienen el valor de la velocidad media para que se ha tenido en cuenta para la determinación de los tiempos de viaje entre localizaciones por carretera y aire, respectivamente. Para el transporte marítimo, se emplea una matriz con distancias, en lugar de tiempos. La función GenericDistance devuelve la distancia entre las dos localizaciones que se introduzcan como argumentos según el medio de transporte, y teniendo en cuenta la velocidad media de referencia adecuada si se trata de transporte terrestre o aéreo.

LogisticInfo			
-	ListOfLocations()	:	String
-	LandTransportMatrix()	:	String
-	SeaTransportMatrix()	:	String
-	AirTransportMatrix()	:	String
-	TruckSpeed	:	String
-	AirSpeed	:	Double
-	U_ship	:	Double
-	U_truck	:	Double
-	U_plane	:	Double
+	GenericDistance(input	iLoc1 : String, input	iLoc2 : String) : Double

Figura 94: clase LogisticInfo.

8.2 Aplicación

Se ha diseñado una aplicación que sigue todos los pasos de la metodología según la secuencia definida, genera soluciones factibles para el diseño conceptual del proceso de montaje de un producto a partir del modelo de producto y una información inicial y las evalúa. Se ha desarrollado un primer prototipo de dicha aplicación, lo que constituye una primera implementación de la metodología. El prototipo se ha programado empleando como base la herramienta CAD/CAM CATIA V5/DELMIA, mediante el uso de VB,(Visual Basic for Applications).

En esta sección se explicará el desarrollo del prototipo de la aplicación. Se comenzará detallando los medios que se han utilizado para su creación, luego se describirá todo el proceso de su programación y se planteará su funcionamiento básico.

8.2.1 Medios

Como soporte principal para plasmar las soluciones de montaje que se definen mediante la metodología, se ha seleccionado desde un principio la herramienta CATIA/DELMIA, en su versión 5, Release 21. Se trata de un sistema empleado en la industria aeronáutica para tareas de diseño de producto, de procesos o de ingeniería asistida por computador, su arquitectura permite un uso conjunto con sistemas de gestión de datos, lo que permite la definición de instalaciones PLM. La utilidad de la herramienta en el campo al que se enfocan los desarrollos, así como lo extendido de su uso son las principales razones de su elección. Se considera, en definitiva, que CATIA V5/DELMIA es el entorno de representación de las soluciones buscadas.

Por tanto, los principales resultados obtenidos de la ejecución de la aplicación serán elementos del entorno CATIA V5/DELMIA, como la modelización tridimensional de la línea de montaje, con los modelos digitales de los productos correspondientes y los recursos definidos o la estructura de procesos, con sus correspondientes tiempos y relaciones. El resto de resultados son parámetros calculados mediante la evaluación de cada solución, como el coste total, el tiempo de ciclo, la eficiencia, el coste de transporte y las incertidumbres asociadas, y dicha información, también se incluye en el entorno CATIA V5, mediante su adición como atributos del elemento relacionado en cada caso.

Una parte considerable del trabajo de implementación de la metodología se ha dedicado, en consecuencia, a la creación en el entorno de representación de los elementos correspondientes a las soluciones que se definen mediante la aplicación, que están soportadas por objetos del meta modelo propuesto, en lugar de objetos del modelo interno de CATIA. Dada esta necesidad, se deduce que la posibilidad de programar macros para la automatización de acciones en el entorno ha resultado fundamental para la implementación de la metodología.

Para desarrollar la aplicación, como plataforma para la programación se ha empleado la utilidad de CATIA basada en la programación macros, sub rutinas y funciones, cuyo entorno de trabajo se muestra en la Figura 92. Esto es especialmente útil para acceder a funciones de la herramienta y a información de sus elementos. Por ejemplo, tareas como la creación de un nuevo producto dentro de la estructura de un producto superior o la creación de actividades y relaciones entre ellas son fácilmente automatizables. Esta utilidad se conoce como CATIA Automation, y es principalmente un asistente para la definición de proyectos VBA (Visual Basic for Applications) particularizado para la herramienta CATIA V5 y con acceso a gran parte de las clases de la propia arquitectura del sistema.

La opción de emplear en los desarrollos algunas clases del propio modelo interno de CATIA V5 puede parecer más sencilla y lógica. Se podría emplear, por ejemplo, la clase Product del modelo de CATIA, que representa un nodo dentro de una estructura de producto (un componente o un sub montaje) en lugar de las clases creadas PhysicalProduct y SubAssembly. De esa forma se trabajaría directamente con los elementos del entorno de representación, y no sería necesario crearlos más adelante, como se comentaba anteriormente.

Sin embargo, no se ha podido seguir esta línea de acción debido a una limitación del entorno VBA: tras un corto tiempo de ejecución, los objetos de las clases del modelo interno de CATIA Automation dejan de ser válidos, pues su uso conduce a un error denominado “Automation Error”, se podría considerar que caducan. Si un determinado programa se ejecuta de manera continuada, dichos objetos no caducan; pero si en algún momento se detiene la ejecución de líneas de código, por ejemplo cuando una interfaz está activa y visible, tras un corto período de tiempo, dejan de ser válidos, el uso de cualquiera de sus campos o funciones conduce al error.

Otras de las acciones incluidas en la metodología no ha sido necesario programarlas mediante CATIA Automation, sino que se considera que se deben ejecutar mediante comandos ya existentes en la herramienta. Por ejemplo, la adaptación del diagrama de Gantt de las estaciones de la línea de montaje, desplazando actividades en el tiempo o asignando más unidades de algún recurso, se puede ejecutar perfectamente con los controles que facilita DELMIA. En realidad, es más recomendable de este modo pues posibilita una representación visual inmediata del diagrama y de los cambios que se hagan en él.

En conclusión, se puede decir que la plataforma sobre la que se ha desarrollado la aplicación es CATIA V5/DELMIA, que también constituye el entorno de representación para las distintas soluciones obtenidas y que CATIA Automation ha sido la herramienta utilizada para el desarrollo de la aplicación que implementa la metodología que se propone, si bien hay acciones de la metodología que están soportadas mediante comandos ya incluidos en CATIA V5/DELMIA.

8.2.2 Programación

El grueso de las tareas de desarrollo de la aplicación prototipo que implementa la metodología ha estado relacionado con la programación de las funcionalidades que se proyectaba cubrir. Dicha programación ha consistido principalmente en la codificación de los algoritmos necesarios para la ejecución de las acciones incluidas en el diseño conceptual del proceso de montaje. Esto ha requerido, en muchos casos, de un trabajo importante de búsqueda de las funciones adecuadas dentro del vasto modelo de clases que incluye el sistema CATIA, así como de mucho tiempo para la realización de pruebas del funcionamiento de aquéllas. Se ha empleado para ello en muchas ocasiones el método de “ensayo y error”, al faltar una auténtica documentación exhaustiva que facilite la programación basada en el modelo de clases mencionado.

El lenguaje de programación que se tiene que utilizar en proyectos VBA es el Visual Basic, aunque está más limitado en algunos aspectos que la versión libre de dicho lenguaje. Una de las limitaciones con más repercusión sobre los desarrollos ha sido la imposibilidad de definir listas (o Arrays) de elementos de tamaño variable, es decir, a los que se pueda añadir un nuevo elemento en un momento dado sin redefinir la lista y eliminar el resto de elementos. Ello ha obligado a programar funciones auxiliares específicamente para eso. Además, las funciones siempre se debían definir con entradas “por referencia”, es decir, en las que se pasaba los distintos datos como argumento, de forma que podían ser modificados durante la ejecución de la función.

Para describir las tareas relativas a la programación llevadas a cabo, primero se detallará el proceso seguido para el desarrollo del prototipo. Se explicará el tipo de sub rutinas no vinculadas a un paso concreto de la metodología más importantes implementadas: las relacionadas con el intercambio de información con el entorno. Además, se describirá los procedimientos implementados para el cálculo de atributos. Por último, se explicará de forma breve las principales funciones auxiliares que ha sido preciso programar para la implementación de la metodología.

8.2.2.1 Proceso de desarrollo

El desarrollo de la aplicación prototipo se ha seguido en dos direcciones distintas. De un lado, se ha debido codificar lo que se podría considerar la capa superior de la aplicación, es decir, la inicialización de las distintas interfaces incluidas y la gestión la sucesión entre ellas, la definición de los distintos estados de una solución y la programación del paso de uno a otro o la inicialización de la aplicación, usando el archivo actual como representación de una solución existente, cargando uno distinto o creando uno nuevo. Todo ello se ha realizado de forma coherente con el mapa de interfaces mostrado en la sección 7.1.

Estas tareas de programación se han realizado utilizando principalmente los objetos del propio sistema VBA denominados User Forms, que son las interfaces, y sus funciones asociadas. Para los desarrollos de este nivel, no se han utilizado, por tanto, objetos de clases del modelo interno de CATIA, ni del modelo desarrollado para el diseño del proceso de montaje.

Por otra parte, el trabajo de programación de la aplicación ha incluido la codificación de las acciones de un nivel que se podría calificar como más detallado, es decir, las acciones concretas que se deseaba automatizar para un correcto uso de la metodología. Éstos han sido los desarrollos que han dedicado mayor esfuerzo. Para ellos ha sido indispensable el apoyo en el modelo de clases desarrollado.

Los desarrollos de acciones concretas dentro de la metodología se han efectuado, la mayoría de las veces, siguiendo el mismo proceso básico. La Figura 95 busca ilustrar tal proceso. En primer lugar, para un determinado bloque o etapa de un bloque, se definía las funcionalidades que deberían estar incluidas, partiendo de una idea general de los objetivos de la metodología, y se diseñaba una interfaz que facilitase el acceso a las mismas. Esto se corresponde con la primera parte de la Figura 95, en la que se muestra la interfaz para gestión de recursos y operaciones.

Para cada funcionalidad concreta que se deseaba asociar a una etapa, se debía diseñar el algoritmo que posibilitaría su ejecución, lo cual daba como resultado un diagrama de flujo como el que se muestra en la parte central de la Figura 95, enmarcado en azul. Dicho diagrama es el diseñado para cubrir la funcionalidad de selección de los recursos más baratos de una estación, y el botón que la iniciaría se ha destacado en la interfaz de la izquierda.

Figura 95: representación del proceso de desarrollo e implementación seguido.

Cuando ya se disponía de un diagrama de flujo diseñado para cubrir la funcionalidad que se deseaba incluir en esa parte de la metodología, era el momento de realizar la programación. Para ello se empleaba el lenguaje Visual Basic, adaptado para su uso en VBA. En la tercera sección de la Figura 95 (enmarcada en morado) se muestra el módulo que recoge el código de la funcionalidad asociada al botón recuadrado de la interfaz.

8.2.2.2 Intercambio de información con CATIA V5

Uno de los mayores obstáculos encontrados al trabajar en el entorno VBA asociado a CATIA V5 ha sido un error que se da para objetos de las clases del modelo interno de CATIA Automation, cuando un determinado programa lleva cierto tiempo en ejecución, el denominado "Automation Error", o error de automatización. De hecho si el programa se ejecuta de manera continua, dicho error no ocurre, sino que aparece cuando la ejecución se ha detenido en algún momento previo, por ejemplo cuando se muestra un cuadro de diálogo o interfaz, al emplear cualquier función o campo de los objetos de dichas clases que hayan sido definidos con anterioridad.

Una posible solución al problema podría ser implementar que, cada vez que la ejecución se hubiera de detener, al retomarla se volviese a definir los objetos de las clases del modelo interno, a partir de los elementos del entorno. Por ejemplo, si se estaba empleando el objeto prod1 de clase Product, asociado a un nodo de producto del entorno; al retomar la ejecución redefinir prod1 como dicho nodo. Con esa práctica se solucionaría el problema, pero no es posible, debido a que para definir cualquier objeto de estas clases se requiere encontrarlo mediante otro objeto de nivel mayor al que esté asociado, hasta llegar al nivel mayor, que está representado por el objeto de clase Application que se denomina "CATIA".

Para acceder al elemento del ejemplo anterior, una ruta sería la siguiente:

Set prod1 = CATIA.ActiveDocument.Product.Products.Item(m).Products... ..Item(n)

Figura 96: error de automatización de CATIA V5.

Todo ello, si se considera que se busca el producto hijo n -simo dentro de una estructura dada cuyo primer nivel tiene m hijos. Sin embargo, en las condiciones descritas, el objeto CATIA también conduce al fallo por “Automation Error”, por lo que ninguno de sus campos se puede emplear. Cargar el documento en lugar de emplear el campo ActiveDocument tampoco es posible, dado que requiere igualmente de funciones o campos del objeto CATIA. La Figura 96 muestra el mensaje que aparece tras un error de automatización.

La solución encontrada al problema descrito consiste en emplear, para las acciones de generación de aspectos de la solución, objetos de las clases creadas y, una vez se hubiese generado los objetos adecuados para ese paso de la metodología, ejecutar un proceso de creación de los elementos correspondientes en del entorno CATIA V5. Como ese tipo de procesos se ejecuta de forma continua, se pueden completar sin incurrir en errores de automatización. Además, esta forma de trabajar es más cómoda en algunos aspectos, pues permite emplear clases definidas expresamente para la metodología, en lugar de las del modelo interno de CATIA, de las que en a menudo no se dispone de suficiente información para su correcta utilización.

También se ha comprobado que, cuando se retorna al modo interactivo de la sesión de la aplicación CATIA, por ejemplo al ocultar todos los cuadros de diálogo activos, los objetos que anteriormente estuvieran en situación de error de automatización se actualizan, de forma que pueden volver a usarse normalmente. Para algunas partes del prototipo, programadas a partir de versiones anteriores que no tenían los errores de automatización en cuenta, se puede ejecutar el comando “Hide”, incluido para ocultar la interfaz correspondiente, y luego volver a mostrar la interfaz para continuar utilizándola, para prevenir posibles errores.

Como consecuencia de todo lo anterior, aparte de la programación del funcionamiento general de la aplicación prototipo y de acciones concretas que pertenezcan a la metodología, ha sido necesario definir una forma de almacenar la información relativa a la solución que se está definiendo, de forma que se pudiera recuperar en futuras sesiones, dado que los objetos empleados pertenecían a las clases del modelo desarrollado, y no se pueden almacenar de manera permanente en la memoria.

Esta problemática queda en parte resuelta en el momento en que se define una manera de representar cada solución en el entorno CATIA V5/DELMIA. Una solución dada pasa por varios estados de definición, alguno dividido a su vez en etapas, antes de considerarse totalmente desarrollada. Cada etapa de la metodología conduce a un nuevo estado de la solución, o al menos a una actualización significativa, por lo que la representación de dicha solución queda modificada y se debe guardar. Como una solución está totalmente representada mediante elementos del entorno, al realizar un guardado de esos archivos, también se consigue almacenar toda la información de esa solución de manera permanente.

Sin embargo, la segunda parte del problema no queda resuelta con lo anterior. Esta parte consiste en recuperar la información de una solución en estado intermedio, para poder iniciar una sesión de la aplicación desde ese punto. Si bien dicha información, como se ha establecido, está almacenada en diversas formas en los elementos que representan la solución (estructura de procesos y productos de los documentos CATProcess o propiedades de actividades y recursos), al iniciar la ejecución no se dispone de ningún objeto generado.

Es decir, la solución puede estar definida de forma que, por ejemplo, para un nodo se ha generado su línea de montaje, con una estructura de procesos totalmente definida; si se inicia la aplicación en ese punto, no existirán los objetos de clase Station y ActivityObject asociados a la línea de montaje, aunque sí existan las actividades del entorno CATIA con las relaciones adecuadas. Para disponer de unos objetos adecuados que permitan trabajar, se deberán generar a partir de la estructura creada de los elementos de representación.

En otras palabras, la creación de elementos del entorno de representación a partir de los objetos definidos para almacenar la información queda cubierta debido a que es necesaria para crear la misma representación de la solución. Sin embargo el proceso contrario, crear los objetos asociados a la representación de una solución en estado intermedio, se ha debido desarrollarla de forma adicional. Se ha denominado a dichos procesos grabado y extracción, respectivamente.

8.2.2.2.1 Grabado

El proceso de grabado consiste en generar en el entorno de representación los elementos representados por un conjunto de objetos. Esto se realiza después de prácticamente todos los pasos significativos de la metodología, debido a que en ellos lo habitual es trabajar con los objetos, modificándolos, creando nuevos o definiendo sus relaciones. Y, dado que una parte de las salidas esperadas del uso de la aplicación es la representación del proceso en el entorno CATIA, al término de cada etapa que conduzca a unos resultados relevantes se requiere un proceso en el que se creen los elementos análogos en el entorno.

Una solución del proceso de montaje a nivel conceptual viene representada, en esta primera implementación, por un documento de CATIA, de tipo CATProcess, en el que los nodos industriales se representan mediante actividades de la sección de procesos de la estructura PPR. La línea de montaje de cada nodo industrial estará representada por un documento CATProcess distinto, en cuyo árbol PPR se incluirá las estaciones de la línea con sus operaciones correspondientes y los productos y recursos asignados. Este tipo de documentos son, en realidad, una representación digital de procesos industriales reales, si bien son muy básicos dado el nivel conceptual de las soluciones. Por esa razón, en este texto a menudo se habla del término iDMU o maqueta digital industrial, al hacer referencia a estos documentos de representación de las líneas de montaje.

La Figura 97 muestra la correspondencia entre la parte de los objetos, que están definidos según el meta modelo, y la parte de su representación digital, que se ha denominado representación iDMU. Cuando se generan elementos de esta última a partir de elementos de la primera, se denomina grabado, mientras que el proceso inverso se denomina extracción.

8.2.2.2.2 Extracción

Como se ha comentado, la extracción consiste en obtener la información relativa a los objetos correspondientes a una solución en un estado dado y sus relaciones. A partir de los elementos de CATIA que definen dicha solución, como productos, actividades o atributos, se deben crear los objetos asociados adecuados del modelo desarrollado. Es el procedimiento inverso al grabado, y también aparece reflejado en la Figura 97.

Figura 97: correspondencia entre los objetos con los que se trabaja y los elementos del entorno de representación.

Esta tarea se ha programado, para casi todos los bloques, mediante un bucle general que recorra los elementos que se planea recrear mediante objetos del meta modelo. Para cada modelo, se crea el objeto de la clase correspondiente, se le asocian como atributos las propiedades que tuviera en el entorno de representación, y se crean las relaciones adecuadas con otros objetos creados de la misma forma. Si es posible que existan relaciones con objetos que aún no han sido creados, se deben emplear dos bucles distintos: uno para generar todos los objetos y otro para generar sus relaciones entre sí, dado que todos los objetos ya han sido creados.

La programación final de las funciones para la extracción de información de una solución no será igual en todos los casos. Dado que una solución pasa por diversos estados durante su desarrollo, los elementos que la definen van cambiando. Por ejemplo, una solución intermedia puede no tener aún una configuración de las actividades de la línea de un nodo industrial, sino únicamente las estaciones preliminares y la vista As Prepared del producto. En ese caso, no será necesario un proceso de extracción que capture las estaciones y sus actividades hijas y cree los objetos correspondientes.

Por tanto, dependiendo del estado de la solución, será necesario aplicar unos procesos de extracción u otros. La Tabla 28 recoge los 4 principales procesos de extracción que se han desarrollado, así como el punto en la ejecución de la aplicación en el que se aplica y el estado de definición en el que se debe encontrar la solución para ello.

DESCRIPCIÓN DE LA EXTRACCIÓN	MOMENTO DE EJECUCIÓN	ESTADO DE LA SOLUCIÓN
Creación de los objetos IndustrialNode a partir del documento general de representación de la solución, con las propiedades Transport cost, Plant cost, Location, Number of Stops, Cycle Time, Total cost, Resources efficiency, las incertidumbres de estos últimos, Required surface y Transport means.	Al iniciar la aplicación, después de leer la información inicial.	AS_PREPARED en adelante
	Al iniciar el Bloque D (definición de la red logística)	AS_PREPARED en adelante
	Al iniciar el Bloque E (evaluación de la solución)	Resources_Loaded
Creación de objetos Station, sin operaciones, a partir de las actividades del árbol PPR del documento que representa la línea de montaje de un nodo industrial. Se define también el atributo Subject, según los productos asignados.	Al iniciar la segunda etapa del Bloque B (definición de la línea de montaje)	Nodo en etapa Joints_Sequenced.
Creación de los objetos Station y su estructura de procesos interna, con todos los ActivityObjects implicados y sus atributos y propiedades.	Al iniciar la tercera etapa del Bloque B (definición de la línea de montaje)	Nodo en etapa Stations_Created.
	Al iniciar la cuarta etapa (de evaluación) del Bloque B	Nodo en etapa Resources_Assigned
Creación de los objetos ResourceObject correspondientes a los recursos asociados a las actividades del árbol PPR.	Al iniciar la cuarta etapa (de evaluación) del Bloque B, tras crear los objetos Station.	Nodo en etapa Resources_Assigned

Tabla 28: descripción de los procesos de extracción programados y momentos en que se ejecutan.

En definitiva, las condiciones para que se lance un determinado proceso de extracción de información serán dos: que se alcance el punto de la ejecución correspondiente (al iniciar un determinado paso, por ejemplo) y que la solución se encuentre en el estado adecuado.

Como se puede observar, 2 de los procesos incluidos en la Tabla 28 se lanzan en varios momentos de la ejecución. El primero de ellos tiene como función generar los objetos correspondientes a los nodos industriales de la solución, y toda su información asociada, como propiedades o productos entrantes y salientes. Además, supone una actualización del valor del tiempo de ciclo del proceso de montaje, lo cual tiene gran influencia sobre la solución. Esa información es fundamental para el Bloque D, porque supone una actualización de las propiedades de cada nodo, especialmente el tiempo de ciclo del proceso y la superficie requerida por la línea de montaje de cada nodo.

También es imprescindible para el bloque relativo a la evaluación de la solución, pues la información proviene de las evaluaciones realizadas a cada nodo industrial por separado. Además, este proceso se lanza al principio de la ejecución porque se requiere conocer los nodos industriales para poder seleccionar uno y definir su línea de montaje o distribución en planta, aunque para estos dos bloques no es imprescindible que la información esté actualizada antes de su ejecución.

El procedimiento de creación de los objetos Station y los ActivityObject que conforman su estructura de procesos también se aplica en varios momentos de la metodología. En la Tabla 28 se citan dos momentos, pero se debe tener en cuenta que ese bloque se ejecuta una vez por cada nodo industria, así que el procedimiento se lanzará en bastantes ocasiones durante la definición de una solución. Por ello, se puede considerar que es uno de los procedimientos de extracción de información con más importancia de la implementación.

Figura 98: diagrama de flujo para la creación de los objetos Station y sus actividades hijas a partir de la estructura de procesos del documento CATProcess que representa la línea de montaje.

La Figura 98 muestra el algoritmo que sigue el procedimiento para la generación de los objetos Station y su estructura de procesos asociada. No se trata de un diagrama excesivamente complejo, pero se ha definido de manera cuidadosa para incluir toda la posible información requerida. Por ello es un ejemplo representativo de los procesos de extracción de información programados.

Se ha diseñado de forma que sea compatible con los diversos momentos y estados de la solución en los que puede ser llamado. Por ejemplo, si se llama antes de comenzar la tercera etapa del Bloque B, las estaciones del documento estarán enlazadas mediante restricciones de precedencia, y ello se deberá incluir al generar los objetos correspondientes. Sin embargo, si se lanza en la cuarta etapa, las estaciones ya no tendrán dichas relaciones, debido a que ya se ha configurado la línea según el transcurso real del tiempo a lo largo de un ciclo (todas las estaciones comienzan a la vez). El procedimiento está programado para que funcione correctamente en ambos casos.

El algoritmo que sigue el procedimiento es relativamente sencillo, se realizan dos repases de todas las actividades en el primer nivel del documento CATProcess de la línea de montaje, pues dichas actividades representan las estaciones. En el primer repaso, por cada actividad, se crea el objeto Station asociado, y luego se llama a una serie de funciones recursivas para crear toda la estructura de actividades hijas asociadas; asignar el valor del atributo "Subject" (producto sobre el que se aplica) a cada actividad incluida en la estructura; asignar el valor del resto de atributos; generar todas las restricciones de precedencia, respectivamente.

Figura 99: diagrama de flujo de la función recursiva para la creación de una estructura de actividades padre-hijas.

Para repasar todos los miembros de una estructura de padres e hijos, como pueden seguir las operaciones incluidas en una estación, se requiere la utilización de una función de carácter recursivo, es decir, en la que se vuelva a llamar a sí misma durante su ejecución. En esos casos, se suele seguir un algoritmo análogo: se realizan todos los pasos fijados en la función para todos los hijos de un miembro y, si alguno de estos hijos tiene hijos a su vez, se llama de nuevo a la función para él.

La Figura 99 muestra el algoritmo de la función recursiva diseñada para generar todos los objetos ActivityObject que representan las operaciones incluidas en una estación. Es un claro ejemplo del funcionamiento de todas las funciones recursivas empleadas en los procesos de extracción de información. El diagrama muestra cómo se ejecutan los mismos pasos para lo que sería la actividad padre: se identifica su tipo y variante, almacenados en un atributo de tipo String de la actividad dentro del árbol PPR del documento, se obtiene el objeto ActivityType correspondiente y se asocia al ActivityObject que se está definiendo; después se rellenan el resto de campos, nombre, Id, unión de la que procede y Priority. Por último, se realiza un recorrido de todos los hijos de la actividad del árbol PPR y, para cada uno, se crea un nuevo ActivityObject, se ejecuta toda la función desde el principio para él y se añade como hijo del ActivityObject que se estaba definiendo en la ejecución del nivel anterior.

8.2.2.3 Cálculo de atributos

Dado que uno de los aspectos fundamentales de la metodología es la evaluación de las soluciones definidas, el cálculo del valor de ciertos parámetros deberá estar forzosamente incluido en cualquier implementación de la misma. Durante la definición de cada solución, la metodología también requerirá la estimación de diferentes magnitudes, para proporcionar al usuario información sobre el impacto de decisiones como incluir una estación adicional en la línea, elegir una variante de una actividad o un modelo de recurso.

8.2.2.3.1 Mediante código desarrollado

Para el cálculo de atributos cuya fórmula incluye determinar el máximo entre un conjunto de elementos, será necesario programar el algoritmo adecuado, que realice un repaso entre todos los elementos, evaluando el valor de cada uno y actualizando el valor máximo encontrado. Por ejemplo, la Ec. 5.5.14, del apartado 5.5.5, define el tiempo de ciclo como el máximo tiempo de duración de todas las estaciones existentes en el proceso; se incluye más abajo. Para implementar dicha fórmula ha sido necesario programar un código con la configuración del que se muestra a la derecha de la fórmula.

Siendo Stations un array (conjunto) con los TNS objetos Station del proceso, se calcula el valor del atributo “tiempo” de cada estación y, en caso de ser mayor que el máximo encontrado, se almacena. El cálculo del tiempo de una estación se puede realizar llamando a la función CalculateAttVal, que pertenece a la clase ActivityObject, para el objeto de dicha clase asociado al objeto Station correspondiente, mediante el enlace del campo denominado StationProcess.

$$t_{cyc} = MAX_j^{TNS} (time(S_j))$$

```

t_cyc = 0
for j=1 to TNS
    t_j = Stations(j).StationProcess.CalculateAttVal("time")
    if t_j > t_cyc then t_cyc = t_j
next
        
```

Los atributos cuyo valor se corresponde con un sumatorio también han requerido para su implementación la programación de un algoritmo que realice un repaso entre los elementos correspondientes. La Ec. 5.5.25 de la sección 5.5.5, incluida más abajo, regula el cálculo del coste asociado a un nodo industrial, e implica el sumatorio de todos los recursos asignados a alguna actividad del nodo. Para implementar el cálculo de dicho parámetro ha sido necesario, por tanto, codificar un algoritmo como el que se muestra a la derecha de la ecuación.

Considerando un array de objetos ResourceObject que representen a todos los recursos asignados en el nodo industrial, el algoritmo incluye un bucle en el que se recorre cada uno y se llama a su función asociada para el cálculo de su atributo “hourly cost”. Dicha función tiene en cuenta si el recurso está asignado a turnos extraordinarios y tiene un coste distinto en esos casos. Finalmente se sumaría el coste de los transportes hasta el nodo industrial, que se habrán almacenado en el campo correspondiente del objeto IndustrialNode, que en el fragmento de código que se muestra se supone el elemento i-ésimo del array INodes.

$$C_i = CoT_i + CP_i + TC \cdot \sum_{r=1}^{NR_i} CH_r$$

```

c_r=0
for r = 1 to NRi
    c_r = c_r + Resources(r).CalculateAttVal("hourly cost")
next
cost_INi = t_cyc * c_r + INodes(i).TransportCost
        
```

Otro aspecto que se debe aclarar en lo referente al cálculo de atributos es la necesidad de realizar compensaciones debidas a la actualización de valores. Por ejemplo, si se calcula el de un nodo industrial en un momento dado de la ejecución de la aplicación, es posible que más adelante el valor del tiempo de ciclo que se empleó para su cálculo se vea modificado porque se haya definido una estación que requiera un tiempo mayor. En ese caso, se debería actualizar el cálculo del coste asociado a dicho nodo.

La solución más obvia consistiría en repetir el cálculo del coste cada vez que se viera modificado uno de los parámetros que influyen en él. Sin embargo, en la práctica implementar esa medida supone una programación muy compleja, pues se debería realizar para todos los parámetros incluidos en el sistema, e implicaría un tiempo de cálculo de la CPU que se ha considerado excesivo.

En lugar de ello, se ha optado por usar, para cada nodo industrial, los valores de los parámetros que se hubieran determinado si fuera el único nodo del proceso. Así, el tiempo de ciclo empleado para el cálculo del coste del nodo sería el tiempo de duración máximo entre las estaciones del mismo. En el momento de calcular parámetros del proceso completo, como el coste total, se deberá realizar una compensación para cada nodo, que consistiría en dividir el coste del nodo por el tiempo de ciclo calculado sólo para ese nodo, y multiplicar el resultado por el tiempo de ciclo real. De esta forma se evita tener que realizar el proceso de cálculo, que implica muchas líneas de código, de manera reiterada.

Las ecuaciones Ec. 8.2.1 a Ec. 8.2.3 muestran esta forma de actuar para el cálculo del coste total. Para otros parámetros del proceso, como los tiempos o eficiencias en el uso de recursos, se ha procedido a implementar de manera análoga, empleando valores “locales” del nodo asociado y posteriormente realizando compensaciones en el cálculo del valor total.

$$t'_{cyc\_i} = MAX_j^{NS_i} (time(S_j)) \quad \text{Ec. 8.2.1}$$

$$Cost(IN_i) = Cost(T_{i \rightarrow i+1}) + t'_{cyc\_i} \cdot \sum_{r=1}^{NR_i} [h\_Cost'(R_r)] \quad \text{Ec. 8.2.2}$$

$$Cost_T = \sum_{i=1}^{N_{IN}} (Cost(IN_i) \cdot t_{cyc}) / t'_{cyc\_i} \quad \text{Ec. 8.2.3}$$

8.2.2.3.2 Empleando métodos de CATIA V5

En algunos momentos de la ejecución de la aplicación, se emplea un método para el cálculo de atributos que consiste en aprovechar la función del entorno CATIA de cálculo automático actualizado de algunas propiedades. Esta forma de proceder se ha empleado para el cálculo de tiempos, en la evaluación de cada nodo industrial, en la Etapa 4 del Bloque B. Anteriormente, era posible la estimación de tiempos a través de las funciones de los objetos de las clases del modelo desarrollado, teniendo en cuenta sus propiedades y las relaciones de precedencia entre los objetos ActivityObject.

Sin embargo, en la parte final de la Etapa 3 del mismo bloque, puede ser necesario que el usuario desplace algunas actividades en el diagrama de Gantt para evitar posibles incompatibilidades en el uso de recursos compartidos. Al realizar ese tipo de acciones de manera interactiva, las relaciones entre los ActivityObject que representan a las actividades creadas en el entorno posiblemente no se corresponderán con la configuración del diagrama de Gantt.

Para una adecuada estimación de los tiempos, en momentos posteriores a la ejecución de la tercera etapa del Bloque B para un nodo industrial determinado, el método implementado consta de dos pasos. Primero, se actualiza los tiempos de todas las actividades simples de la estación o de la actividad compuesta cuya duración se quiere estimar. Esta actualización es necesaria por si se ha modificado el número de unidades asignadas de alguno de los recursos o asignado algún modelo de recurso con una velocidad distinta. Se debe especificar el tiempo actualizado como nuevo valor de la duración de las actividades del entorno correspondientes a las actividades simples.

Figura 100: propiedades de una estación en el entorno de representación.

El segundo paso consiste en obtener el elemento del entorno correspondiente a la estación o actividad compuesta, cuyo tiempo se habrá actualizado de manera automática según la nueva configuración del diagrama de Gantt y la duración actualizada de las actividades simples; y tomar el valor de la propiedad adecuada. La Figura 100 muestra la parte de procesos de la representación de la línea de montaje del estabilizador horizontal, definida con 3 estaciones. Se han desplegado las propiedades de la primera estación y, como se puede observar, una de ellas se denomina “Calculated cycle time”. Se trata del tiempo de duración de la actividad, que se actualiza de forma automática y tiene en cuenta todos sus elementos hijos, con sus duraciones y distribución en el tiempo.

8.2.2.4 Otras funciones y sub rutinas destacadas

Además de las funciones desarrolladas para cubrir aspectos relacionados con la generación de soluciones según la metodología y de las creadas para la implementación, se ha empleado un gran número de funciones auxiliares para diversas tareas básicas que se deben realizar durante la ejecución. A continuación se explica brevemente las más importantes de ellas.

8.2.2.4.1 CATIA.FileSelectionBox

Esta función está incluida en la clase Application, a la que pertenece el objeto CATIA. Su cometido es cargar y mostrar el cuadro de diálogo para la selección de un archivo del equipo, mostrando aquéllos con la extensión especificada como argumento. Se devuelve una cadena de texto con la ruta del archivo seleccionado, seguida de su nombre y extensión. De esa forma, es muy sencillo cargar nuevos archivos que el usuario debe seleccionar.

La función se emplea en numerosas ocasiones durante la ejecución de la aplicación prototipo, tanto para cargar archivos como para seleccionar una ruta para almacenar los nuevos generados o los modificados. Así, los documentos asociados a las distintas partes de la solución se pueden guardar, y se puede reanudar a partir de ellos la definición de una solución en un punto de definición intermedio.

8.2.2.4.2 GetParamStrVal

Se trata de una función programada para la obtención del valor de una propiedad de un elemento del entorno de representación, como un product o una actividad. Se debe especificar como argumentos el nombre de dicho elemento, su tipo y el nombre de la propiedad, y la función realiza una búsqueda dentro del documento activo actual. Se devuelve una cadena de texto con el valor de la propiedad buscada, por lo que posteriormente se debe realizar una conversión al tipo de dato requerido.

La función es totalmente imprescindible para la implementación de la metodología, puesto que el intercambio de información con los elementos del entorno de representación es un aspecto fundamental de la misma.

8.2.2.4.3 SetParamValOrCreate

Representaría el proceso inverso a la función anterior. La función se ha desarrollado para definir el valor de una determinada propiedad de un elemento del entorno de representación. Se incluye como argumentos el nombre y tipo del elemento, el nombre de la propiedad, su valor como cadena de texto y el tipo de dato de que se trata.

Un aspecto muy útil de esta función es que se ha programado de forma que, si la propiedad buscada no existe dentro del elemento correspondiente, por ejemplo porque aún no ha sido creada, se crea en ese momento, y se define su valor según el argumento de entrada. Gracias a ello, durante los desarrollos de las etapas correspondientes a la evaluación, se ha podido incluir nuevos atributos a obtener de la evaluación de una solución sin tener que añadir código en el que se creen dichas propiedades con anterioridad.

8.2.2.4.4 RefreshListOf...

Se trata de un conjunto de funciones con una configuración similar. Se han desarrollado para compensar la limitación que impone el entorno VBA, consistente en no permitir la definición de conjuntos de datos, o “arrays” de tamaño dinámico. En la mayoría de lenguajes, se puede declarar este tipo de conjuntos, y luego ampliarlos, añadiendo más elementos que los especificados inicialmente; si se hacen las declaraciones adecuadas. Ello resulta especialmente útil cuando no se conoce a priori el número de elementos que se desea gestionar.

Visual Basic sí permite el uso de arrays dinámicos, pero el entorno VBA tiene restringida esa opción. Por ello, es necesario dar un rodeo: se debe declarar el array sin un tamaño definido, y posteriormente especificarlo. De esa forma, es posible modificar el tamaño posteriormente, redeclarando el array. Sin embargo, en este último paso se elimina de forma automática todos los datos almacenados anteriormente. Para añadir nuevos datos más allá del tamaño establecido se debe, por tanto, almacenar la información previa en un array auxiliar, redefinir el array original con un tamaño mayor, y reintroducir los datos originales y el nuevo.

Este proceso se ejecuta con una alta frecuencia durante la ejecución de la aplicación prototipo, al capturar las actividades de un documento de tipo CATProcess, los nodos de la estructura de un producto o cuando el usuario debe definir un número de elementos de algún tipo, entre otros muchos ejemplos. Por ello, ha sido indispensable la definición de funciones de este tipo.

Se ha programado una función distinta para cada posible clase o tipo de dato a almacenar en un array de elementos. Teóricamente sería posible cubrir todas las necesidades con una sola función, declarando los argumentos de entrada de la forma precisa para que se pudiese aplicar a objetos de distintas clases, pero trabajar con objetos sin clases declaradas ocasiona complicaciones adicionales en VBA, por lo que sencillamente, se ha definido una función distinta para cada clase. Simplemente se copia todas las líneas de código de las otras funciones y se modifica la clase en tres puntos clave del código.

8.2.2.4.5 *ListProducts*

Se ha programado esta función con el objetivo de capturar la estructura de un producto del entorno CATIA V5. Se trata de una función recursiva en la que se parte de un nodo de producto y se recorren todos sus hijos. Si se detecta que un determinado hijo tiene hijos a su vez, se llama a la misma función para él. Cada nuevo nodo encontrado será un elemento de tipo producto del entorno, y se almacena en un array. Los productos que se detecta que corresponden a componentes individuales se almacenan, además, en un array distinto, destinado a las piezas.

Además se va definiendo una matriz que almacena la estructura entera del producto inicial, incluyendo el índice de cada nodo de producto encontrado en un puesto determinado por su posición dentro de la estructura, que se determina a partir del nivel de recursión y las ejecuciones previas de la función. El índice de cada nodo será la posición que ocupa en el array de salida.

Esta función se emplea repetidas veces durante la ejecución de la aplicación. Por ejemplo al iniciar dicha ejecución con soluciones en un estado intermedio de definición, que requieran el uso de los procesos de extracción descritos en la sección 8.2.2.2.2.

8.2.2.4.6 *ActivityTreeAnalysis*

De manera análoga a *ListProducts*, esta función se ha desarrollado para capturar la estructura de un proceso compuesto, tanto las actividades simples y compuestas que forman parte de ella como la misma configuración de la estructura. Se trata también de una función recursiva en la que se recorren todas las actividades hijas de una determinada actividad compuesta y, cuando se detecte que una también tiene hijas, se llama de nuevo a la función para dicha actividad.

La función es imprescindible para todos los procesos de extracción que requieran analizar estructuras de procesos, y para algunos procesos de evaluación o estimación de parámetros, dado que en muchas ocasiones ello implica la suma de las propiedades de las actividades presentes en la estructura de una actividad más compleja.

8.2.2.5 *Exploración de métodos y objetos de CATIA V5*

Una de las mayores dificultades encontradas durante los desarrollos ha sido el desconocimiento del modelo interno de clases de CATIA V5. Trabajar con objetos pertenecientes a dicho modelo ha supuesto un alto esfuerzo debido a que en muchas ocasiones no se disponía de suficiente información acerca del papel de muchas de las funciones y campos de sus clases. Si bien la herramienta CATIA provee de un glosario con todas las clases de su modelo junto con una explicación de cada una y sus campos y procedimientos, la información que contiene se considera, en ocasiones, demasiado escueta.

También se dispone de apartados relativos a la automatización en el documento de ayuda de la herramienta, pero ello únicamente cubre unos casos muy básicos, y principalmente para los módulos de diseño de la pieza y diseño del producto, mientras que la aplicación prototipo se ha desarrollado empleando, en gran medida, objetos pertenecientes a los módulos de diseño de procesos. Aún así, los documentos de ayuda han sido de bastante utilidad para los primeros momentos de aprendizaje del uso de la automatización.

Asimismo, ha servido de mucha ayuda para las tareas de programación de la aplicación prototipo algunas utilidades disponibles en el entorno de desarrollo de proyectos VBA. Una de ellas es la función de "Autocompletar", al escribir en el código el carácter "." Tras un objeto de una clase declarada, se muestran los campos y métodos accesibles de dicha clase. Ello ha servido de guía para comprender la forma de trabajar con algunas clases.

Figura 101: asistencia para autocompletar y explorador de objetos del entorno VBA.

Esa información también está disponible en un explorador de objetos que también provee el mismo entorno de desarrollo de VBA. Para cualquier clase, tanto del modelo interno de CATIA V5 como otras programadas en algún proyecto cargado en el sistema, el explorador permite visualizar todos sus campos y métodos, con hipervínculos a otras clases para una navegación más sencilla. Además incluye una opción de búsqueda por palabras, lo que ha sido útil para acceder a determinadas funciones que se deseaba emplear en los desarrollos. La Figura 101 muestra la función “Autocompletar”, a la izquierda, y el explorador de objetos, a la derecha, ambos con la información de la clase Application desplegada, si bien en el primer caso se busca a partir de un objeto de dicha clase, denominado CATIA.

8.2.3 Funcionamiento

En esta sección se describe algunos aspectos básicos del funcionamiento de la aplicación prototipo desarrollada para implementar la metodología. Dichos aspectos son la llamada a la aplicación y el salvado de soluciones, y son fundamentales ya que están relacionados con la utilización de la aplicación partiendo desde el entorno CATIA V5/DELMIA.

8.2.3.1 Arranque y despliegue

La aplicación prototipo requería un procedimiento que controlara su inicialización y otro distinto para su despliegue en caso de que se hubiera ocultado. No basta con un único procedimiento debido a que, al iniciarse por primera vez, se requiere la ejecución de diversos procesos de extracción de información, así como la lectura del diccionario PRD asociado; mientras que para mostrar de nuevo la interfaz general, tras haberse ocultado, no es necesario todo ello.

Teóricamente se podría utilizar un único comando, y programarlo de forma que se ejecute un proceso u otro en función de las condiciones, pero se ha preferido optar por dos comandos distintos, uno para inicializar la aplicación y otro para mostrar la interfaz si está oculta o, lo que es lo mismo, reanudar la aplicación. Se debe tener en cuenta que al ocultar una interfaz, se sigue manteniendo en la memoria toda la información que almacenaba. Una de las características que se deseaba para la aplicación radicaba, precisamente, en que fuera posible combinar las acciones que incluye con otras que se pueden realizar de forma interactiva en el entorno CATIA V5/DELMIA.

Se ha desarrollado unos comandos similares para los bloques B y C, para la definición de la línea de montaje y de la distribución en planta de los distintos nodos industriales. La Figura 102 muestra unas barras de herramientas creadas dentro de la herramienta CATIA V5, para la ejecución de comandos de arranque y despliegue de la aplicación y las etapas mencionadas. La barra de herramientas de la izquierda contiene, de izquierda a derecha, los comandos para el inicio de la aplicación, despliegue de la misma si está oculta o inicio en modo de pruebas (para tareas de desarrollo). Los comandos de la derecha sirven para iniciar el Bloque B, desplegarlo si estuviera oculto, y mostrar o iniciar el Bloque C.

Figura 102: comandos para arranque y despliegue de la aplicación prototipo y bloques B y C.

Para este último bloque, sí es indistinto el proceso de mostrar o iniciar, dado que su interfaz asociada no almacena ninguna información, ni requiere ningún procedimiento especial de inicialización

Todos los comandos relativos a los bloques B y C se aplicarían para el documento activo actual, por lo que éste debe ser el documento de representación de la línea de montaje de algún nodo industrial o aparecerá un mensaje de advertencia y se cerrarán. Ello se detecta a través de las propiedades del documento activo actual.

8.2.3.2 Salvado

El proceso de salvado de las soluciones que se generan durante la ejecución de la aplicación tiene gran importancia, principalmente para poder realizar el trabajo de diseño del proceso de montaje en varias sesiones. Este proceso está incluido dentro de la metodología, pero no se ha implementado de forma explícita en la aplicación prototipo.

La razón es que se ha considerado que, dado que en la mayoría de pasos se posibilita ocultar las interfaces para utilizar interactivamente el entorno CATIA, lo más adecuado es que el usuario ejecute el proceso de guardado de los documentos de representación, tanto de las soluciones como de las líneas de los nodos industriales. De esa forma se aprovecha la utilidad de la herramienta para el guardado de documentos, y no es necesario dedicar tiempo al desarrollo de funciones equivalentes.

La posibilidad de retroceder a pasos anteriores también está incluido en la metodología. Esto forma parte de la filosofía seguida, que consiste en que, si en algún punto se detecta que una solución no va a ser factible, o va a repercutir en unos costes demasiado elevados, sea posible retroceder hasta un punto de la definición a partir del cual se pueda desarrollar ésta en una dirección diferente que sortee dichos problemas.

Esta posibilidad tampoco se encuentra explícitamente implementada en el primer prototipo de la aplicación, pero es perfectamente viable que el usuario la use: únicamente tendría que realizar guardados de los documentos que representan las distintas partes de una solución en distintos momentos de su definición. En los casos de uso del Capítulo 9 se ha seguido esta posibilidad para la definición de variantes de una misma solución.

8.3 Representación de soluciones

Un aspecto esencial de la implementación de la metodología es la forma en que se representan las distintas soluciones que se pueden obtener al emplearla para el diseño conceptual del proceso de montaje. La implementación se ha basado en la herramienta CAD/CAM CATIA V5, y las soluciones que se van definiendo al ejecutar el prototipo estarán representadas mediante documentos de dicho entorno.

Los documentos utilizados para la representación de soluciones serán los del tipo Process, destinado a los procesos industriales. La parte de CATIA dedicada a la definición de ese tipo de elementos se denomina DELMIA, y está asociada principalmente a ese tipo de documentos, si bien los elementos concretos que incluyen dependen del módulo concreto (como definición de procesos de mecanizado, definición de procesos generales o simulación de procesos). Además cada documento del tipo incluye enlaces a otros documentos, principalmente de tipo Producto o tipo Pieza, que representarán los productos y recursos asociados.

8.3.1 Documento de representación general de la solución

Se ha definido una forma de representar una solución completa en un documento de tipo CATProcess del entorno CATIA V5. Dicho documento se ha denominado documento de representación general. Se trata de un documento de tipo Process o documento de proceso, destinado a representar procesos industriales, incluyendo actividades, productos y recursos y las relaciones entre ellos.

Una solución completa del diseño conceptual, tal y como se ha definido en la metodología, no representa directamente el proceso industrial, sino más bien los elementos de mayor nivel entre los que se distribuye dicho proceso, como los nodos industriales definidos, los productos intermedios que se generan en ellos y los transportes requeridos. Por tanto, se ha debido adaptar las características disponibles en los documentos de tipo Proceso (entidades de tipo actividad, producto y recurso) para representar los elementos que definen a una solución.

Los distintos nodos industriales definidos estarían representados por actividades del primer nivel de la sección de procesos del árbol PPR del documento. Cada actividad tendrá definidos unos atributos correspondientes a las propiedades que tiene un nodo industrial, según los modelos desarrollados. Será en dichas propiedades, y en las creadas en el nodo de procesos principal, donde se almacenen los resultados obtenidos de la evaluación completa de la solución y otras realizadas durante la ejecución, como las evaluaciones locales de los distintos nodos, o la del transporte, realizada al final del Bloque D.

Además se asignará como productos a esas actividades las partes del producto principal que se ensamblan en los nodos industriales correspondientes. Así, a la actividad que representa al nodo denominado “Assembly of Nose Fuselage” se le asignará el sub montaje “Nose Fuselage”.

En la sección de productos del árbol PPR del documento, se incluirá las vistas del modelo de producto As Designed y As Planned, cuando ésta sea definida. No se incluirá ningún elemento dentro de la sección de recursos. Se creará, además, unos hipervínculos a los documentos externos de Excel que contendrán la información logística y la relativa al diccionario PRD.

El documento general también es importante como medio para acceder a las representaciones digitales de las líneas de los diferentes nodos sin necesidad de buscar sus rutas de acceso. Entre las propiedades de las actividades que representan a los nodos industriales se ha incluido la denominada HL_iDMU, cuyo valor será una cadena de texto con la ruta y el nombre del documento con la representación digital tridimensional de la línea de montaje de dicho nodo. Las fases de la aplicación que se deben ejecutar sobre cada línea de montaje incluyen un procedimiento para la apertura de su documento asociado a partir del documento de representación general: el usuario selecciona el nodo en el documento general y se carga la representación digital de la línea correspondiente.

La forma de representar una solución completa mediante un documento de procesos de CATIA, de formato CATProcess, ya se describió en la sección 7.1.4. La Figura 51, en dicha sección, muestra la estructura del árbol PPR de dicho documento para un ejemplo de solución, y la correspondencia entre sus distintos elementos, además de su relación con los documentos de procesos que representan las líneas de montaje de los nodos de la solución.

La representación de la línea de montaje de un nodo industrial se explica en el siguiente apartado, y la Figura 103 muestra un ejemplo de ello.

8.3.2 Representación digital del proceso

Anteriormente se describía cómo una determinada solución conceptual del proceso de montaje podía ser representada mediante un documento de tipo Proceso del entorno CATIA V5/DELMIA. Para implementar la metodología también se ha recurrido a otro tipo de representación, para los procesos industriales de la línea de montaje asociada a cada nodo. Cada una de dichas líneas se representa también mediante un documento de tipo Proceso, aunque en este caso sí se emplean sus distintos tipos de entidades para representar elementos según su propósito inicial. Es decir, las actividades del documento representarán procesos de la línea y los productos y recursos representarán los componentes, herramientas, utillajes, personal e instalaciones que se encontrarán físicamente presentes en la planta.

Figura 103: representación digital de la línea de montaje de un nodo industrial.

En la sección 1.5 se hablaba del concepto recientemente acuñado de de Maqueta Digital Industrial (Industrial Digital Mock-Up ó iDMU) para referirse a una representación tridimensional digital de procesos de la línea de montaje, mediante los modelos CAD de todos los elementos implicados. Si bien la representación de la línea que se puede definir mediante la aplicación de la metodología no puede considerarse una maqueta digital de la misma, debido al bajo nivel de detalle de las soluciones buscadas, sí se considera un punto de partida adecuado para el desarrollo posterior de dicho concepto.

Las representaciones digitales que se plantean no contienen muchos de los elementos que sí estarán presentes en la maqueta digital del proceso. Sin embargo sí se incluyen unos componentes y recursos fundamentales con unos modelos digitales básicos que se podrán reemplazar por versiones más detalladas, y emplear como referencia para posicionar elementos no representados en el nivel conceptual de desarrollo del proceso de montaje. Además, la metodología incluye la definición de la superficie de trabajo requerida en la planta, considerando la geometría básica de los productos y recursos básicos.

La Figura 103 muestra la representación digital de la línea de montaje del nodo industrial para el montaje de la sección de cola de una solución, según las condiciones del caso práctico CU2, descrito en el apartado 9.2. En la parte izquierda se muestra el árbol PPR del documento CATProcess, una lista con los procesos o actividades, productos y recursos.

Como se puede observar, para la representación tanto de estaciones como de tareas se ha empleado elementos del tipo básico de actividad, dado que en el primer prototipo desarrollado todas las propiedades se asocian mediante los modelos definidos, según el tipo de cada actividad. En futuras implementaciones se planteará la utilización de las librerías de CATIA para la definición de tipos de actividades personalizados con los atributos y características deseados definidos en el diccionario PRD asociado a una solución.

En la Figura 103 se muestra desplegada la primera estación del proceso, y una operación denominada “Nest” incluida como hija de la misma. Se puede observar que dicha operación tiene asignados unos recursos y un producto, que en este caso será el componente sobre el que se aplique la acción. Esos elementos también estarán referenciados en las secciones de productos y recursos del árbol PPR. La operación también presenta unos atributos asociados, entre los que se incluye el tipo de actividad según el PRD.

Figura 104: diagrama de Gantt del documento de representación de una línea de montaje.

Se ha desarrollado la implementación de forma que, para acceder al total de atributos que posee esa actividad, se identifica al objeto `ActivityType` que representa su tipo y se obtiene sus atributos asociados. Sólo se crean en el documento de representación los atributos cuyo valor se define o modifica durante la ejecución y debe ser almacenado.

Las distintas operaciones o actividades, simples y compuestas, se relacionan en el proceso para definir la secuencia de ejecución que se seguirá en cada ciclo. Los documentos de tipo Proceso de CATIA incluyen una visualización de dicha secuencia mediante un diagrama de Gantt. Durante la ejecución de las etapas de la metodología que conducen a la definición de las líneas de montaje, se crean las relaciones descritas en el documento de representación, según el modelo y las acciones ejecutadas por el usuario. La Figura 104 muestra el diagrama de Gantt de las actividades de la primera estación del proceso de la línea de montaje cuya representación muestra la Figura 103. Se ha destacado la operación que aparecía desplegada en esta última.

Como conclusión, se puede resumir que una solución definida mediante la ejecución del primer prototipo de aplicación basado en la metodología queda representada mediante un documento que recoge los aspectos generales y elementos de nivel superior de la misma, al cual se vincula, por cada nodo industrial definido, un documento que representa el proceso de la línea de montaje asociada. Dicho documento incluye los modelos digitales de productos y recursos considerados para el nivel de detalle de los desarrollos, posicionados en el espacio, así como las relaciones entre todos ellos que controlan la ejecución del proceso.

8.4 Modelos específicos para casos prácticos

Para implementar la metodología ha sido necesario desarrollar un prototipo de aplicación que incluyese sus distintos pasos, basado en unas clases programadas según el modelo definido, y que generase soluciones representadas según lo descrito en la sección 8.3. Sin embargo, para validar la metodología, no basta con el desarrollo del prototipo, también se debe ejecutar, de forma que se muestren sus características. Y para la ejecución de muchos de los pasos incluidos en la metodología, es necesario disponer de la representación digital de muchos de los elementos implicados en el proceso de montaje, tanto productos como recursos. También se requiere un modelo específico con los tipos de actividades y recursos que se incluirán en el proceso, o diccionario PRD.

Por tanto, ha sido necesario diseñar unos modelos digitales, para representar el producto principal cuyo proceso de montaje se está definiendo así como cada modelo concreto de recurso que pudiera asignarse a una estación. Se ha generado, asimismo, un diccionario PRD que se pudiese emplear en la ejecución del prototipo desarrollado.

8.4.1 Modelo PRD definido

Un elemento imprescindible para ejecutar el prototipo desarrollado es el modelo PRD, con la definición de todos los tipos de actividades, tipos de recursos, modelos específicos y especialidades de los trabajadores tenidos en cuenta para la definición de procesos. Para la realización de pruebas y desarrollo de casos de estudio se ha definido un diccionario PRD, al cual pertenece la información de las tablas Tabla 4, Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8. La información completa se incluye en el Capítulo 13.

Para la definición del modelo PRD definido para la ejecución de pruebas y de los casos de estudio, se definió 4 tipos de uniones industriales, definidas como actividades compuestas. A partir de ahí se definieron las actividades hijas que debía incluir una unión de cada tipo, cada uno de los tipos de dichas actividades, así como los tipos de recurso que tendrían asignados.

Finalmente se crearon unos modelos específicos de recursos, pertenecientes a uno o varios tipos, y unas especialidades básicas de los recursos humanos.

La información del diccionario PRD, para el prototipo desarrollado, se debe incluir en dos archivos de Excel, uno para los tipos de actividades y otro para el de recursos. Las columnas recogen las propiedades de cada tipo provenientes del modelo general, a las que se pueden añadir atributos específicos de cada tipo de elemento, como se describe en la sección 8.1.2.

8.4.2 Modelos digitales

Como se ha comentado, para validar la metodología se requiere ejecutar el prototipo que la implementa, y para ello es imprescindible contar, además de con un modelo concreto de procesos y recursos como el mencionado en la sección anterior, con un modelo de producto y la representación digital del mismo, así como con la representación de los modelos de recursos. Por tanto, ha sido necesario definir un modelo de producto y diseñar su geometría y, análogamente, la geometría de los modelos específicos de los posibles recursos que se podrían incluir en una solución.

8.4.2.1 Productos

Se definió un modelo de producto correspondiente a una aeronave, dado el enfoque de la metodología, relacionado con la producción en el sector aeronáutico. El modelo tiene una geometría sencilla, inspirada en el modelo A400M, de la empresa Airbus. Se eligió ese modelo dado que se tiene constancia de que su producción implica instalaciones situadas en distintos países, lo que requiere complejos planes de transporte de componentes.

Para el diseño de la geometría se empleó el módulo de diseño de superficies de CATIA V5, mediante el que se definió la superficie exterior del producto. Posteriormente se le dio un espesor para obtener un sólido. Finalmente se dividió el modelo, que originalmente era una única pieza, en un número de componentes.

La Figura 105 muestra dos versiones del modelo de producto diseñado. La primera versión constaba de 24 componentes individuales, y se empleó como modelo de prueba para la mayor parte de desarrollos de la implementación. La segunda versión se componía de 44 componentes, incluyendo 9 para cada ala y los 4 motores turbo hélice. Dicho modelo se utilizó para los desarrollos finales de los Bloques B, C y D y para los casos de estudio CU1 y CU2, si bien el primero de ellos consiste en el diseño del proceso de montaje del ala derecha, considerándola el producto final.

El modelo de producto diseñado únicamente contiene la geometría exterior básica del producto real, no contiene ningún componente interno, como dobles capas, nervios de refuerzo, maquinaria ni ningún sistema. Sin embargo, la simplicidad del modelo no impide que se pueda incluir procesos asociados a componentes representados en versiones de nivel mayor de detalle. Por ejemplo, será posible incluir el tipo de actividad “Instalar sistemas eléctricos” aunque no se incluya una representación digital de dicho sistema. Según el producto tenga un nivel de desarrollo mayor, se irán integrando los nuevos componentes, o las nuevas versiones de componentes ya existentes, al proceso definido mediante la metodología.

En el Capítulo 9 se describe con más detalle los modelos de producto empleados en los casos de estudio CU1 y CU2, incluyendo el conjunto de uniones definido para ambos.

Figura 105: modelos de producto diseñados para la ejecución del prototipo.

8.4.2.2 Recursos

Para que fuese posible la ejecución del prototipo desarrollado para implementar la metodología, también era necesario disponer de unos modelos digitales adecuados que representasen los distintos modelos específicos de recursos definidos en el diccionario PRD utilizado en los casos prácticos. Se diseñó de formas distintas los modelos digitales correspondientes a las herramientas, los utillajes y los operarios o recursos humanos.

8.4.2.2.1 Herramientas

Se ha diseñado los modelos digitales de las herramientas implicadas en los tipos de actividades incluidos en el PRD definido, de forma que cada modelo específico de esos tipos de recursos tengan asociado un modelo CAD. No obstante, se emplea la misma geometría para algunos grupos de recursos. Por ejemplo, todos los recursos correspondientes a clases de puente grúa se asocian a la misma representación, mostrada en la zona superior izquierda de la Figura 106.

En la Figura 106 se muestra, además, un andamio genérico, un carrito transporte industrial y una plataforma elevadora. Cada uno está asociado a varios modelos específicos de recurso, todos con una geometría similar pero distintas prestaciones.

Se diseñó, además, una geometría genérica para cualquier tipo de recurso que no tuviera ningún modelo CAD asociado. Dicha geometría consiste en un prisma de color verde dimensiones 180 x 250 x 250 mm. La razón de incluir el modelo genérico es la de permitir un posicionamiento del recurso que representa en la línea de montaje.

Figura 106: modelos digitales de 4 recursos.

Figura 107: dos recursos de modelos distintos representados por la misma geometría en el árbol PPR.

Figura 108: dos recursos del mismo tipo, representados por la misma geometría.

Aunque varios recursos estén representados por el mismo modelo digital, dentro del documento de tipo Proceso que representa la línea deben aparecer como productos distintos. Además si hay varias unidades del mismo modelo de recurso, también deben aparecer en la representación como objetos diferentes. Por ello, en el entorno CATIA V5/DELMIA, cada recurso estará representado por un producto con una estructura que consta de un nodo de nivel superior, que representa al objeto físico o unidad del modelo de recurso asignada, un nodo que representa el modelo y un nivel bajo que contiene la geometría.

La Figura 107 muestra dos recursos cargados en un documento de tipo Proceso, denominados CB1_nb2 y D1_nb1. Cada uno tiene un modelo específico distinto, CB1 y D1 respectivamente, pero ambos estarán representados por la misma geometría, recogida en el producto Generic resource, correspondiente al prisma de color verde mencionado anteriormente. En la representación de la línea aparecerá, por tanto, una unidad de prisma por cada uno. El caso mostrado en la Figura 108 es algo distinto. Hay dos unidades del mismo modelo de recurso, la grúa puente BOBCm1500, con mismos componentes y misma geometría. De nuevo se trata de dos instancias distintas del mismo modelo digital, y en la representación aparecerán 2 ejemplares de puente grúa BOBCm1500.

En el Capítulo 13 se incluye todos los modelos de recursos diseñados, junto con una lista de los modelos específicos de recursos a los que están asociados.

Figura 109: modelos de 4 utilajes junto con los componentes para los que están diseñados.

8.4.2.2.2 Utilajes

Los utilajes constituyen una categoría de recursos que se ha tenido en cuenta de una forma distinta durante la implementación. Se ha considerado que debe existir un utilaje con geometría distinta para cada sección concreta del producto. Ello implica que, según como se defina la estructura As Planned y la secuencia de montaje de los productos intermedios asociados a los distintos nodos, los utilajes de una determinada solución pueden no ser válidos para otras. La Figura 109 muestra, de izquierda a derecha y de arriba abajo, los utilajes para estaciones del ensamblaje del fuselaje delantero, la sección de cola, el avión completo y el fuselaje completo; junto con sus respectivos productos intermedios asociados.

Para la ejecución de los casos de uso de la aplicación prototipo, se ha definido todos los utilajes necesarios para las soluciones contempladas. Para ello, se han definido variantes a partir de unos mismos modelos, cuando se requiriese utilajes para sub montajes de productos cuyo utilaje asociado ya se hubiese diseñado. Por ejemplo, los utilajes para operaciones del ensamblaje del fuselaje delantero y la sección de cola se diseñaron partiendo del asociado al fuselaje entero, que a su vez se diseñó partiendo del asociado al producto completo.

En el Capítulo 13 se muestran todos los modelos de utilajes diseñados para la ejecución del prototipo de implementación de la metodología.

8.4.2.2.3 Recursos humanos

Otro tipo de recurso distinto al resto son los recursos humanos, o recursos de tipo “Worker”. Según el diccionario PRD definido para ejecutar el prototipo de implementación, se trata de un único tipo de recurso, para el cual hay un número de posibles especializaciones. Cada una de éstas corresponde a una profesión, o a un tipo de rol dentro del proceso de montaje, y está relacionada con un número de habilidades.

Sin embargo, todas las especializaciones de los recursos humanos tienen asociado el mismo modelo digital, que representa a una persona. Durante la mayor parte de los desarrollos y las primeras pruebas de ejecución del sistema se empleó un modelo digital generado mediante un módulo específico de CATIA, que define la geometría de un ser humano a partir de unos datos básicos de altura y medidas, ajustables según un valor del percentil en el que se incluiría la persona. Dicho módulo está enfocado a la representación y simulación de procesos industriales. En la derecha de la Figura 111 se puede observar el modelo digital descrito.

Sin embargo, al cargar cierto número de modelos digitales de operarios dentro del mismo documento de representación de una línea de montaje, algo que se realiza en repetidas ocasiones durante la aplicación de la metodología, se comprobó que de manera frecuente el sistema dejaba de responder durante cierto tiempo, o lo hacía de manera muy lenta, y que el proceso de guardado del documento de tipo proceso requería un tiempo inusualmente largo y en ocasiones implicaba el cierre de la aplicación.

Por esta razón se tomó la decisión de diseñar un modelo digital más sencillo para representar a los operarios asignados a las operaciones del proceso de montaje. Se diseñó una geometría muy sencilla a partir de la del modelo generado mediante el módulo específico de CATIA, como muestra la Figura 110; aprovechando que dicho modelo presenta unas medidas y proporciones ajustadas a la realidad. La Figura 111 muestra una comparación entre ambos modelos.

Figura 110: diseño del modelo digital de un trabajador, basado en el modelo incluido en CATIA.

Figura 111: modelo digital de un trabajador diseñado para la implementación, junto con el generado con el módulo específico de CATIA, respectivamente.

Capítulo 9

Casos de estudio

Este capítulo detalla los casos de estudio que se han ejecutado con el primer prototipo de implementación de la metodología. Se trata de 2 casos distintos, denominados CU1 y CU2 (por caso de uso). Han consistido, respectivamente, en diseñar el proceso de montaje del ala de una aeronave y de un avión completo. El objetivo de los casos tiene como objetivo la validación de las distintas características de la metodología, a través de su primer prototipo.

9.1 Definición conceptual del proceso de montaje de un componente aeronáutico

Como primer caso de estudio se propone la definición del montaje de un producto más sencillo que un avión completo. Se trata de una de las alas, la derecha. Para encontrar una solución adecuada para su industrialización a nivel conceptual se han desarrollado en paralelo dos alternativas, que difieren principalmente en la estructuración de sus líneas de montaje principales, con tres y dos estaciones, respectivamente. Se han denominado alternativas A1 y A2, y el caso de estudio, CU1.

En los próximos apartados se describirá, primero, las condiciones iniciales para la ejecución de las acciones incluidas en el caso, incluyendo el diccionario PRD y el modelo de producto. A continuación se describirá las alternativas que se han estudiado y comparado y se detallará paso por paso la ejecución de todo el caso de uso. Finalmente se expondrán los resultados obtenidos y la solución al caso.

9.1.1 Condiciones iniciales y modelo del producto

La obtención de una solución al diseño conceptual del proceso de montaje viene determinada en gran medida por las condiciones iniciales de cada caso. Dichas condiciones determinan todos los datos de partida y elementos de que se compondrá el problema, e incluyen el diccionario de PRD de recursos y actividades, los datos respecto a distancias y tiempos de viaje y el mismo modelo del producto.

9.1.1.1 Diccionario PRD

El diccionario PRD incluye todos los tipos de actividades, simples y compuestas, que podrán existir en las soluciones generadas, así como todos los posibles recursos, incluyendo tipos y modelos, o especialidades para los recursos humanos. Además se incluye gran parte de la información básica necesaria para realizar los cálculos necesarios, como tiempos de ejecución de actividades, costes horarios de recursos o información acerca de las plantas industriales disponibles.

El diccionario PRD empleado para este primer caso de estudio también se ha utilizado para el segundo, dado que es lo bastante completo como para soportar las operaciones necesarias para el ensamblaje de los productos de ambos casos. El diccionario completo se incluye en los Anexos, y la Tabla 29 muestra un extracto del mismo, con la definición de las actividades compuestas correspondientes a la ejecución de dos tipos distintos de unión, concretamente las existentes en el modelo de este primer caso de uso.

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

	INVOLVED OPS	IS SEP	P.	OP. TYPE	VARIANT	ATT.S			SUBJECT
Joint Fuselage-fuselage (FF)	Load and Position P1	No	1	Positioning at jig	Base comp.	Cost	Real	€	Heaviest
	Load and Position P2	No	1	Positioning at jig	Added comp.	Unc. in cost	Real	€	Not Heaviest
	Check interfaces and alignment	No	2	Testing	Structure alignment	Time	Real	s	
	Nest	No	3	Nesting	-	Unc. in time	Real	s	Not Heaviest
	Assemble	No	4	Mechanical joint execution	Metal-metal	Subject	String		
	Check continuity with masses	Yes	5	Testing	Structural continuity				Set
	Install systems in interfaces	Yes	6	Combined system installation	-				Set
	Install enclosures and/or closing devices	Yes	6	Addition of small components	-				Set
	Connect installations	Yes	7	Combined system connexion	-				Set
	Check functionalities	Yes	7	Functional tests	-				Set
	Apply sealer at junctions	Yes	8	Sealing	-				Set
	Retire from jigs	Yes	9	Positioning at jig	Added comp.				Set
Joint Composite Components (CC)	Load and Position P1	No	1	Positioning at jig	Base comp.	Cost	Real	€	Heaviest
	Load and Position P2	No	1	Positioning at jig	Added comp.	Unc. in cost	Real	€	Not Heaviest
	Check interfaces and alignment	No	2	Testing	Structure alignment	Time	Real	s	
	Positionate P2 into its final position	No	3	Nesting	-	Unc. in time	Real	s	Not Heaviest
	Assemble	No	4	Mechanical joint execution	Composite-composite	Subject	String		
	Check continuity with masses	Yes	5	Testing	Structural continuity				Set
	Seal fuel tank	Yes	6	Sealing	-				Set
	Install systems in interfaces	Yes	6	Combined system installation	-				Set
	Connect installations	Yes	7	Combined system connexion	-				Set
	Install enclosures and/or closing devices	Yes	7	Addition of small components					Set
	Check functionalities	Yes	8	Functional tests					Set
	Apply sealer at junctions	Yes	9	Sealing					Set
	Retire from jigs	Yes	10	Positioning at jig	Added comp.				Set

Tabla 29: extracto del diccionario PRD: operaciones involucradas en las uniones de tipo FF y CC.

9.1.1.2 Información Logística

Para la búsqueda de la solución óptima de la red logística, se requiere la información relativa a las distancias entre las localizaciones que pueden ser conectadas, así como los tiempos que se tarda en recorrerlas con los medios de transporte que se valoran.

Para hacer posible la ejecución de los casos de estudio que aquí se presentan, ha sido necesario recopilar esa información y elaborar unas tablas que permitan su acceso por parte del sistema. Las localizaciones donde se ubican las plantas disponibles se han definido a partir de centros de producción de Airbus ya existentes. Los datos de distancias y tiempos, por otra parte, se han obtenido empleando la aplicación gratuita Google Maps. La Tabla presenta las localizaciones que se han definido en el sistema. Los datos de tiempos y distancias entre ellas se han incluido en la Tabla 65 de la sección 13.4 de los Anexos.

- Getafe, Spain
- Illescas, Spain
- Sevilla, Spain
- Puerto Real, Spain
- Castellon, Spain
- Valencia, Spain
- Bilbao, Spain
- Toulouse, France
- Saint-Nazaire, France
- Nantes, France
- Albert, France
- Marseille, France
- Caen, France
- Hamburg, Germany
- Bremen, Germany
- Nordenham, Germany
- Varel, Germany
- Laupheim, Germany
- Bristol, UK
- Brighton, UK
- Portsmouth, UK

Tabla 30: lista de localizaciones disponibles.

9.1.1.3 Modelo del producto

El primer caso de estudio se ha centrado en la definición del proceso de montaje del ala derecha de un avión. Se trata de un producto con una composición sencilla, con 9 componentes. El bajo número de componentes facilita las pruebas de utilización de las etapas de la metodología implementadas, y la demostración de su uso. En casos de estudio posteriores se emplearon productos de mayor complejidad.

Las figuras Figura 112 y Figura 113 presentan dos vistas del modelo tridimensional CAD del producto. Para su creación se ha empleado la herramienta CATIA V5, concretamente los módulos de generación de superficies y generación de sólidos. Se muestra, respectivamente, una vista general del montaje completo y una vista explosionada junto con el árbol de producto de CATIA V5 donde se identifican los componentes. La Tabla 31 recoge los componentes y su denominación en el caso de estudio.

Las uniones del modelo se han definido siguiendo bucle de cadena abierta, es decir, cada componente está unido al conjunto mediante un único camino, por lo que el número de uniones será igual al de componentes menos uno.

Figura 112: representación digital del producto del CU1.

Code	Part number
RWB1	Right wing body 1
RWB2	Right wing body 2
RWF1	Right wing flat 1
RWF2	Right wing flat 2
RWF3	Right wing flat 3
RWS1	Right wing slat 1
RWS2	Right wing slat 2
RWS3	Right wing slat 3
RWT	Right wing top

Tabla 31: lista de componentes y nomenclatura del modelo del CU1

	Comp. 1	Comp. 2	Type	NEIs
Joint 1	RWB1	RWB2	FF	20
Joint 2	RWB1	RWS1	CC	22
Joint 3	RWB1	RWS2	CC	22
Joint 4	RWB1	RWF1	CC	18
Joint 5	RWB1	RWF2	CC	18
Joint 6	RWB2	RWS3	CC	19
Joint 7	RWB2	RWF3	CC	15
Joint 8	RWB2	RWT	CC	6

Tabla 32: lista de uniones del modelo del CU1.

Figura 113: vista explosionada y componentes del modelo del CU1.

Figura 114: maqueta digital de las líneas de montaje de las alternativas definidas en el CU1.

Además de los dos componentes involucrados, cada unión tiene asociada cierta información. En primer lugar, su tipo, que determinará los procesos industriales requeridos para su ejecución. En la Tabla 32 se observa que la mayoría de uniones son de tipo CC (Composite Components), excepto la primera, de tipo FF (Fuselage – Fuselage), pues se trata del ensamblaje de componentes estructurales.

El número de elementos de cada unión se refiere a la cantidad de elementos de ensamblaje (por ejemplo, remaches) que será necesario crear. Este número está relacionado con las dimensiones de los componentes involucrados y tiene influencia directa sobre el tiempo necesario para completar las operaciones asociadas a la unión.

9.1.2 Alternativas comparadas

En este primer caso de estudio se ha definido y evaluado dos alternativas distintas para el proceso de montaje del ala derecha. Ambas se han definido con la misma estructura As Planned, con único submontaje. Esta composición es la más sencilla posible y también la más lógica, puesto que las dimensiones del producto estudiado hacen factible un proceso de montaje en una única localización. La diferencia entre las dos se encuentra en la composición de línea de montaje, para cada una las uniones se ejecutan siguiendo una secuencia distinta, por lo que poseen distintas estructuras As Prepared.

9.1.3 Proceso seguido

A continuación se detallará, paso por paso, todo el proceso que se ha seguido para, aplicando la metodología desarrollada, encontrar una solución para el proceso de montaje del modelo del producto del CU1. Se ha comenzado definiendo la estructura As Planned, común para ambas alternativas. Posteriormente se ha elegido ejecutar primero la definición de la red logística y después la definición de la línea y su distribución en planta. Finalmente se ha ejecutado de nuevo la definición automática de la red logística, para chequear que sigue siendo la opción óptima.

9.1.3.1 Asociación de las condiciones iniciales

El primer paso al aplicar la metodología consiste en asociar toda la información inicial relativa al producto y al modelo de procesos y recursos específico del caso, o diccionario PRD. Los botones de la izquierda de la interfaz sirven para esa finalidad. La Figura 115 muestra la interfaz de la aplicación prototipo al ejecutar esta primera etapa del caso de uso primero. Como se observa, únicamente los comandos de la zona izquierda están disponibles. Se debe cargar lo que se considera la estructura As Designed del producto, aunque en la práctica, basta con un modelo digital del producto que contenga todos sus componentes en sus posiciones adecuadas, sin importar la estructura en que estén organizados.

Lo que en la interfaz se ha designado condiciones iniciales se corresponde con el diccionario PRD. Al ejecutar el comando “Load Initials Conditions” se abre un cuadro de diálogo para seleccionar un archivo Excel que lo contenga en el formato adecuado. Primero se pide que se cargue la sección de Recursos y después la de actividades. En este caso de estudio se ha asociado el diccionario PRD que aparece recogido en el apartado 13.4, del que la Tabla 29 muestra un extracto.

Figura 115: ejecución de la etapa inicial de la metodología para el CU1.

Figura 116: interfaz para definir un documento CATProcess con la información de las uniones.

Figura 117: definición de la estructura As Planned del CU1.

Los últimos comandos de la columna permiten asociar el conjunto de uniones que se asocian al montaje del producto. Se posibilita la asistencia en la creación del documento CATProcess que contiene dicha información, partiendo de un modelo digital del producto, o bien de cargar un archivo ya existente. La Figura 116 muestra la interfaz para asistir en la definición del documento CATProcess, junto con una captura del generado para este primer caso de uso. La interfaz permite definir los componentes implicados, así como el tipo de unión.

9.1.3.2 Definición de la estructura As Planned

El siguiente paso que se ha seguido en la ejecución del caso de estudio ha sido la definición de la estructura As Planned. Como se ha comentado previamente, se ha optado por la estructura más sencilla posible, dada la simplicidad del modelo de producto. Se ha definido, por tanto, un único sub montaje del que dependen los 9 componentes individuales. Eso se traducirá en que únicamente existirá un nodo industrial.

Para la generación de esta estructura empleando la interfaz definida en la metodología, únicamente basta con ejecutar el comando aceptar o aplicar, dado que por defecto el formulario genera un único sub montaje, con el nombre "Aircraft". Tan solo ha sido necesario, por tanto, cambiar el nombre del sub montaje antes de pulsar "Accept". La Figura 117 muestra la interfaz mencionada, con la secuencia seguida en el caso de uso marcada en azul, junto con la estructura generada.

9.1.3.3 Optimización de la logística

Después de crear la estructura As Planned, el siguiente paso puede ser o bien la definición de la red logística, o la definición de los nodos industriales entre los que se reparte la línea de montaje. En el caso de estudio se ha optado por la primera opción. Después de definirse la red, principalmente ubicar los nodos en plantas existentes disponibles y seleccionar los medios de transporte entre ellas, cada nodo podrá definirse con mayor información (por ejemplo el precio del espacio de la nave industrial o el nivel de salarios del país en cuestión).

A pesar de que únicamente exista un nodo industrial en las alternativas definidas, hallar la solución óptima no es trivial. En primer lugar, es necesario ubicar también los puntos de origen de los componentes individuales o, dicho de otra forma, seleccionar qué fábricas (o empresas) los producirán. No todas las plantas existentes en el sistema pueden producir todos los componentes, y algunas de ellas únicamente sirven como origen de componentes o como planta para un nodo industrial, pero no ambas cosas.

La solución para la red logística, al menos en este punto, es válida para ambas alternativas, dado que tienen la misma estructura As Planned (es decir, mismos nodos industriales y mismos nodos de la red). Sin embargo, al completar el paso de la definición de la distribución en planta fue necesario ejecutar de nuevo la definición de la logística para verificar que la solución óptima no había variado.

La Tabla 33 muestra la solución que se ha obtenido para este caso de estudio y sus resultados. El coste está referido a un ciclo, mientras que el número de elementos a transportar a la vez (N) se corresponde, lógicamente, con el número de ciclos que pasan por cada transporte. Dicho valor se calcula teniendo en cuenta la capacidad de carga del medio, el peso del componente y un número máximo que evita un retraso excesivo en la producción del primer avión. El parámetro de la columna de la derecha es la incertidumbre en el tiempo.

Se observa que el único nodo industrial se ha ubicado en Brighton, y como lugares de origen de los componentes se ha escogido la misma planta de Brighton y otra situada en Portsmouth. Sería más barato ubicarlo todo en único lugar, pero la planta de Brighton, por sus características, no puede ser el origen de los componentes originados en Portsmouth, mientras que ésta última planta no puede escogerse como nodo industrial que albergue una línea de montaje. La Tabla 34 muestra las características de las dos plantas seleccionadas, se observa que la segunda no tiene superficie disponible, los componentes que pueden partir de cada planta, los medios que pueden llegar o salir y valores como la altura mínima en la nave, el coste de utilización o el nivel de salario (en la metodología se toma como indicador para ello el valor del salario mínimo en ese país)

NODE OF THE NETWORK	LOCATION	MEAN	COST (€)	N	Ut (h)
Industrial node of Right_Wing1	Brighton, UK	-	-	-	-
Origin of RWT	Portsmouth, UK	Truck	136,48	29	3,52
Origin of RWB1	Portsmouth, UK	Truck	626,82	9	1,17
Origin of RWB2	Portsmouth, UK	Truck	598,51	13	1,63
Origin of RWF1	Brighton, UK	-	-	-	-
Origin of RWF2	Brighton, UK	-	-	-	-
Origin of RWF3	Brighton, UK	-	-	-	-
Origin of RWS1	Brighton, UK	-	-	-	-
Origin of RWS2	Brighton, UK	-	-	-	-
Origin of RWS3	Brighton, UK	-	-	-	-
TOTAL COST OF TRANSPORT/ CYCLE TIME			1361,80		

Tabla 33: solución obtenida para la distribución logística del CU1.

	Cost rate (€/h)	Useful surface	Location	Arr/Dep means	Wage level (€)	Max height (m)	Possible origins
Plant1	120	7200	Brighton, UK	ST1, ST2, AT1, AT2, LT1	1379	15	RWS1, RWS2, RWS3, RWF1, RWF2, RWF3
Plant2	110	0	Portsmouth, UK	ST1;ST2;LT1	1379	12	RWB1, RWB2, RWT

Tabla 34: extracto del PRD: información relativa a las plantas industriales seleccionadas en el CU1.

9.1.3.4 Secuenciación de las uniones del producto

Se debe elegir la secuencia de las uniones que se deben completar en la línea de cada nodo. En este caso, únicamente existe un nodo, que incluye todas las uniones del modelo. La secuenciación de las uniones que conducen al ensamblado de un producto o sub montaje determina la estructura As Prepared del mismo. En la metodología esto se realiza ordenando las uniones correspondientes en una secuencia. También es posible posicionarlas para que se realicen de forma simultánea, lo que en la práctica se traduce como en la misma estación de la línea. A todo ello se da asistencia en la metodología mediante una interfaz que muestra todas las uniones, con sus componentes, y permite la secuenciación descrita.

Figura 118: secuenciación de las uniones para la alternativa 1 del CU1.

Sec: J1, J2 y J4 → J3 y J5 → J6, J7 y J8

Sec: J1 → J2, J3, J4, J5, J6, J7 y J8

Figura 119: estructuras As Prepared de ambas alternativas del CU1 y secuencia de uniones asociadas

Dado que las dos alternativas planteadas para el caso de uso difieren en el número de estaciones de la línea y las uniones que se completan en ellas, es en este punto donde se ha realizado la separación. La Figura 118 muestra la ejecución de la etapa descrita para la generación de la secuencia de uniones de la alternativa 1. La Figura 119 compara las dos estructuras As Prepared definidas y las secuencias de uniones correspondientes.

Se puede observar la relación entre secuencia y estructura. Por ejemplo, para la primera alternativa en primer lugar se completan las uniones 1, 2 y 4, por lo que se ensamblan los componentes RWB1, RWB2, RWS1 y RWF1 (es decir, las dos partes del cuerpo, y el Flap y el Slat interiores). Esos componentes componen un subgrupo que será el de menor nivel dentro de la estructura. En el árbol de la Figura 119 aparece con el nombre “Complex Assembly n3”. Se trata de un nombre auxiliar generado automáticamente, dado que no hay ningún submontaje definido con dichos componentes. La segunda alternativa presenta un subgrupo denominado “Subassembly result of WS_Joint1”, dado que es producto de la realización de una única unión.

9.1.3.5 Definición de estaciones

Tras secuenciar la ejecución de las uniones implicadas, el siguiente paso según la metodología es definir completamente las estaciones de la línea, en cuanto al número de ellas y a las operaciones que comprenden. La secuenciación resultante del paso anterior representa una posible configuración de la línea, si se considera que cada puesto en la secuencia representa una estación.

Esta etapa de la metodología parte de dicha configuración y permite añadir nuevas estaciones y reasignar operaciones de montaje a estaciones distintas (según su atributo “IsSeparable”). Para evaluar las repercusiones de dichas actuaciones, la interfaz muestra el tiempo de ciclo de cada estación y el de la planta (el máximo de entre todas las estaciones). El objetivo es que los tiempos de todas las estaciones sean lo más pequeños posible y similares entre sí, dado que estaciones de duración mucho menor que el resto implican una peor eficiencia en el uso de recursos. También se muestra el tiempo de ciclo del proceso de montaje completo, que no se debería sobrepasar. Se debe tener en cuenta que todos esos datos son únicamente estimaciones, dado que aún no se conocen los recursos concretos que se asignarán o los posibles turnos extra de las estaciones.

En el caso de estudio, para ambas alternativas se ha mantenido la configuración de la línea correspondiente a la secuencia resultante del paso anterior. Se ha tomado esa decisión atendiendo a los valores de los tiempos estimados para las distintas estaciones, muy parecidos entre sí y suficientemente bajos, en ambos casos. La Figura 120 muestra la definición de las estaciones de la primera alternativa. Como se puede observar se ha mantenido las 3 estaciones resultantes del paso anterior y los tiempos son similares.

Al ejecutar el comando “Apply”, de forma automática se genera toda la estructura de procesos que se ha definido desde la interfaz. En cada una de las estaciones definitivas se crean todas las operaciones implicadas, que serán aquellas asociadas, según el PRD, a las uniones que se completan en la estación. Algunas operaciones son eliminadas dado que se repiten en las uniones a realizar en la estación. Por ejemplo, en la lista destacada en naranja en la Figura 120, la operación “Load and Position RWB1” aparecería repetida pues existe en todas las uniones, sin embargo ha sido eliminada de forma automática al iniciarse el formulario. La estructura final de procesos generada en este paso incluye unas restricciones de precedencia, definidas según el valor del atributo “Priority” de cada operación dentro de su actividad padre. En la zona inferior derecha de la Figura 120 se muestra un diagrama de PERT con las operaciones de la estación primera de la alternativa 1, se aprecian las relaciones de precedencia entre actividades.

Figura 120: definición de las estaciones de la línea de montaje para la alternativa 1 del CU1.

9.1.3.6 Gestión de recursos y operaciones

Una vez se ha configurado las estaciones de la línea de montaje, el siguiente paso según la metodología definida es definir totalmente las operaciones existentes en la estructura de procesos creada. Principalmente se trata de asignar unos modelos de recursos concretos a todas las operaciones de la línea según sus necesidades, y de definir una variante para aquellas actividades que aún estén abiertas. En este paso también existe la posibilidad de añadir turnos extra a alguna estación, o asignar recursos extra a una actividad para cubrir la capacidad requerida o mejorar el tiempo de finalización.

Este paso se ha realizado para las dos alternativas definidas en el caso de estudio. La metodología permite la asignación de recursos y definición de actividades abiertas de forma manual. Sin embargo, el camino recomendado es la optimización automática, según el criterio que se considere más adecuado entre coste, tiempo o un balance de ambos; y la realización de algún cambio manual en las operaciones que se considere necesario. De esa forma se han definido las operaciones de ambas alternativas.

La primera alternativa presentaba tiempos muy elevados, por lo que se optimizaron las estaciones, y todas sus operaciones hijas, atendiendo al tiempo. Sin embargo, una vez realizada la optimización el tiempo seguía siendo elevado, por lo que se modificó el número de turnos para todas las estaciones a 2 turnos. Con esto se consigue que para el mismo número de días laborables se obtenga el doble de trabajo. En los cálculos, se considera que las horas de trabajo necesarias se reducen. La Figura 121 muestra la ejecución de este paso de la metodología para la alternativa 1: al ser demasiado elevado el tiempo estimado para la primera estación, se procede a aumentar el número de turnos.

Figura 121: definición de operaciones y recursos para la alternativa 1 del CU1, aumento del número de turnos.

La línea de la segunda alternativa se ha definido de manera análoga. En este caso se optó inicialmente por no realizar una optimización de tiempos, sino únicamente aumentar a 2 el número de turnos, para evitar el aumento del coste. Se comparó estos resultados con los obtenidos añadiendo dicha optimización y finalmente se escogió dicha opción, dada la ganancia en tiempo obtenida a cambio del incremento de coste previsto. La Tabla 35 muestra los resultados estimados para las estaciones de ambas alternativas según las distintas configuraciones probadas.

Se debe resaltar que estos resultados son únicamente provisionales, y sólo válidos para la realización de comparaciones, puesto que más adelante se realizará la auténtica asignación de recursos, muchos de los cuales se compartirán, por lo que los costes variarán mucho en las evaluaciones finales.

	Estación	Coste (€)	Tiempo (h)	N. turnos	Optimizada
A1	WS1	58872	44,48	1	tiempo
	WS2	43275	43,85	1	tiempo
	WS3	63888	39,85	1	tiempo
	WS1	83960	22,24	2	tiempo
	WS2	61690	21,92	2	tiempo
	WS3	91111	19,93	2	tiempo
A2	WS1	12206	43,57	1	No
	WS2	108623	42,51	1	No
	WS1	17435	21,78	2	No
	WS2	155153	21,26	2	No
	WS1	23181	20,52	2	tiempo
	WS2	192680	20,04	2	tiempo

Tabla 35: resultados preliminares de las alternativas 1 y 2 con distintas configuraciones de números de turnos y optimizaciones según el tiempo.

Cuando la línea de montaje está totalmente definida, en cuanto a los modelos de recursos concretos asignados a las operaciones, se debe pulsar "Apply", para que automáticamente se generen los recursos físicos finales que se asociarán a los procesos. Dichos recursos físicos serán de los modelos elegidos, y se podrán compartir entre varias operaciones de la línea que no se solapen en el tiempo. Sobre la representación digital del proceso de montaje, cada recurso físico asignado se manifiesta mediante una nueva instancia de la representación CAD del modelo de recurso correspondiente (o del maniquí empleado para representar a humanos).

La generación automática de los recursos finales se puede ejecutar de dos formas: siguiendo o no la regla de “Perfect Sharing”. Dicha regla asume que todos los recursos de un mismo modelo en una misma estación son una única entidad que se comparte entre las operaciones de la estación, por lo que luego se debe verificar que dichas operaciones no se solapen. En caso de solapamiento entre actividades que compartan un recurso, el usuario debe retrasar alguna de ellas para evitarlo, o bien asignar recursos distintos. Si no se aplica la regla, se supone que cada asignación implica un recurso físico distinto, por lo que posteriormente el usuario deberá verificar si es posible que se comparta alguno de los recursos asignados, para economizar.

En este primer caso de uso, se ha seguido la regla de “Perfect Sharing” para las dos alternativas, por lo que ha sido necesario modificar la distribución de las actividades en el tiempo para evitar incompatibilidades. La Figura 122 muestra cómo se ha debido modificar la estación WS1 de la primera alternativa. Se puede observar cómo los recursos destacados (el trabajador Técnico de logística número 1 y la grúa modelo BOBCm15000 número 1) estaban asignados a operaciones que se realizaban al mismo tiempo. Por ello se han creado nuevas restricciones de precedencia, de forma que se ejecuten de manera secuencial, como se puede apreciar en la parte derecha de la figura. Este proceso se realiza empleando el visualizador de la asignación de recursos como diagrama de Gantt que incluye CATIA V5, y se ha efectuado en todas las estaciones de las alternativas generadas.

En este punto del proceso también es posible realizar de forma interactiva una optimización en la asignación de recursos que el sistema haya pasado por alto. En las primeras actividades de la estación WS1 de la primera alternativa, por ejemplo, se han asignado grúas distintas, dada la capacidad requerida para cada actividad. En la Figura 123 se puede apreciar que para una actividad se ha asignado la grúa BOBCm2000 (de capacidad de carga de 2 toneladas), mientras que para las siguientes, de características similares, se ha asignado el modelo BOBCm1500 (de 1.5 toneladas de capacidad). Esto se debe a que estas últimas implican mover componentes de menor peso. Para optimizar, sin embargo, lo más adecuado sería asignar únicamente la grúa de mayor capacidad, de forma que se comparta entre todas las operaciones.

Figura 122: Verificación de la compatibilidad de la asignación de recursos en el CU1.

Sin embargo, dado que en la última operación de la estación WS1 se requiere una grúa de mayor capacidad, el modelo BOBCm15000, es ésta la que se ha asignado a todas las operaciones que requirieran este tipo de recurso. En la Figura 122 se podía comprobar cómo finalmente se asignó dicho recurso.

En la primera estación de la segunda alternativa, dado que el submontaje que produce es menos pesado, se han asignado 2 grúas de modelo BOBCm2000, lo que representa un coste menor que una grúa BOBCm15000. En este caso además, dado que se cuenta con 2 grúas, no es necesario desplazar todas las actividades iniciales de la estación. En contrapartida, la eficiencia podrá ser menor, dado que hay mayor tiempo de inactividad de los recursos, aunque es difícil de predecir dado que se pondera teniendo en cuenta el coste de los recursos. Se deberá asignar, además, un Técnico de logística distinto para las actividades solapadas. La Figura 124 muestra la asignación de los 4 recursos (las 2 grúas y los 2 técnicos)

El resto de estaciones de las alternativas, se han procesado de manera análoga, compartiendo los recursos de mayor capacidad y desplazando en el tiempo las actividades solapadas que compartieran recursos. Después de eso es posible ejecutar la evaluación final del nodo industrial, dado que se conoce exactamente el número y tipo de los recursos físicos asignados.

Figura 123: recursos distintos asignados a actividades debido a las distintas capacidades requeridas.

Figura 124: verificación de compatibilidad de asignación de recursos en segunda alternativa del CU1.

Figura 125: resultados intermedios de evaluar el nodo industrial de la segunda alternativa del CU1.

	A1	A2
Cycle Time (h)	22.74	33.93
U_{ct} (h)	0.67	0.84
Cost (€)	18771.63	19734.05
U_c (€)	111.79	117.09
Efficiency	0.266	0.263
U_{Eff}	0.00027	0.00026

Tabla 36: resultados de las evaluaciones intermedias de los nodos de las alternativas del CU1.

9.1.3.7 Evaluación de nodos industriales

Se ha ejecutado el comando que evalúa la línea de montaje definida para el único nodo industrial de las alternativas desarrolladas. Se calculan los mismos parámetros que en la evaluación final de la metodología, tiempo, costes, eficiencia y las incertidumbres correspondientes, referido todo ello al nodo industrial. Esos resultados se exportan de forma automática al documento general que representa la alternativa correspondiente y se emplean para la evaluación final, junto con los datos del resto de nodos y de la red logística.

Al ejecutar la evaluación de un nodo, se desbloquea la etapa de definición de la distribución en planta o Lay out de la línea. Los resultados se muestran por pantalla para que el usuario tenga una visión más precisa de las características del nodo industrial tal y como se acaba de definir. La Figura 125 muestra los resultados tal y como se presentan al usuario, para la segunda alternativa. La Tabla 36 contiene los resultados de ambas alternativas. Se puede apreciar que finalmente la alternativa 2 presenta un tiempo mucho mayor, dado que su segunda estación requiere un mayor tiempo para su realización, debido a que comprende las operaciones de un número alto de uniones. Una manera de mejorar la situación para esa alternativa consistiría en aumentar el número de turnos de la segunda estación a 3, pero eso incrementaría el coste. La Figura 126 muestra el diagrama de Gantt de la línea de la segunda alternativa, con las dos estaciones destacadas en naranja.

9.1.3.8 Definición del Lay Out

El paso siguiente tras la definición de la línea de montaje, según la metodología, es siempre el diseño preliminar de la distribución en planta de sus elementos. Dicha etapa se puede completar utilizando las herramientas interactivas que provee CATIA V5, junto con algunas funcionalidades que se han desarrollado dentro de la metodología.

Para posicionar cada una de las estaciones, se ha creado un comando que permite seleccionar todos los elementos asociados a una estación seleccionada. En el cuadro de diálogo de la Figura 127 se ha remarcado la primera estación, por lo que todos sus elementos asociados son automáticamente seleccionados de forma que se puedan desplazar al mismo tiempo. La Figura 128 muestra cómo se desplazan en conjunto todos los elementos de otra estación hasta su lugar en la representación de la planta. La idea, en definitiva, es posicionar las estaciones enteras en su lugar en la línea y luego posicionar respecto a él los productos y recursos de cada una. De esa forma se ha realizado la distribución en planta de las líneas de las dos alternativas estudiadas.

Casos de estudio

Figura 126: diagrama de Gantt de la línea de montaje final del la segunda alternativa el CU1.

Figura 127: selección de los elementos asociados a la estación 1 de la primera alternativa del CU1.

Figura 128: desplazamiento de los elementos de la estación 3 de la línea principal de la primera alternativa del CU1.

Una vez todos los elementos se han posicionado, se debe generar un recurso auxiliar que representaría el suelo de la planta. Dicho recurso no representa ningún coste y se emplea para poder calcular la superficie que requiere la distribución en planta planeada. Al ejecutar el comando “Floor!”, que puede verse en el cuadro de diálogo de la Figura 127, se carga un nuevo producto con una pieza prismática de una altura conocida, de 1 mm, y cuya base debe cubrir toda el área ocupada por la línea. El boceto que genera la forma de la pieza se puede modificar de forma que la línea quepa en el suelo. En la Figura 129 se aprecia cómo se ha modificado el suelo para adaptarse a la disposición de la línea de la segunda alternativa.

Cuando se ha adaptado el suelo a la disposición de todos los elementos, si se pulsa “Refresh all” en el cuadro de diálogo se calcula la superficie ocupada por el suelo y dicho valor se actualiza en el documento principal, que contiene enlaces con todos los nodos industriales de una alternativa dada. La Tabla 37 contiene el valor de la superficie requerida para cada alternativa estudiada.

Figura 129: estimación de la superficie requerida por la alternativa 2 del UC1 mediante la generación del suelo de la planta.

Casos de estudio

	Alternative A1	Alternative A2
Required surface (m ²)	1802.18	1198.56

Tabla 37: superficie requerida por las alternativas estudiadas en el CU1.

La Figura 130 y la Figura 131 muestran, respectivamente, la maqueta digital de las alternativas primera y segunda. Se deben tomar como un diseño preliminar que luego será de utilidad para definir sucesivos modelos digitales con mayor nivel de detalle.

Tras haber definido la distribución en planta de ambas líneas de montaje, es necesario ejecutar de nuevo la definición de la red logística, dado que los cambios pueden modificar la solución óptima, por ejemplo teniendo en cuenta el coste final del nodo puede que el sistema elija plantas con un nivel de salarios distinto, o bien la superficie final requerida es mayor que la disponible en la planta elegida en la ejecución anterior. Para el caso de estudio se volvió a ejecutar, por tanto, la definición automática de la red logística, y se obtuvo la misma solución que en la primera ejecución, previa a definir la línea de montaje.

Figura 130: distribución en planta de la línea principal de la alternativa 1 del CU1.

Figura 131: distribución en planta de la línea principal de la alternativa 2 del CU1.

9.1.4 Resultados obtenidos

Cuando una alternativa se ha definido totalmente siguiendo las etapas de la metodología, es apta para ser evaluada con el método basado en la Lógica Borrosa desarrollado. En el caso de uso, se ha ejecutado dicho paso para ambas alternativas estudiadas.

Las funciones finales obtenidas al aplicar el sistema de Lógica Borrosa se muestran en la Figura 132. Se puede apreciar a simple vista que la primera alternativa, con 3 estaciones en la línea de montaje, obtiene una mejor puntuación que la segunda, que se definió con 2 estaciones. Las puntuaciones finales, obtenidas del cálculo del centro de gravedad del área encerrada por las funciones finales, aparecen en la Tabla 38. También se muestra los valores de otros parámetros con influencia sobre los resultados finales.

Los valores están referidos a la producción de una unidad del producto. El denominado tiempo de cola, por ejemplo, hace referencia al tiempo que se tardaría en producir un producto completo, en este caso un ala derecha.

Como conclusión de este caso de estudio, se resalta que la mejor alternativa es claramente la primera. El motivo principalmente radica en un menor tiempo de ciclo, lo cual en sí mismo es una ventaja y además abarata el coste de utilización de los recursos. Una posible mejora para la alternativa 2 puede ser asignarle un número de turnos de 3 a la segunda estación de su línea, y comprobar cómo cambia tanto el tiempo como el coste.

Figura 132: funciones de desborrosificación de las alternativas primera y segunda, respectivamente.

	Cycle time (real h)	U_t (h)	Total Cost (€)	U_c	Effi- ciency (%)	UEff (%)	Transport Cost (€)	Lead Time (h)	Final Score (over 10)
A1	54.74	2.68	20133.43	791.12	26.59	0.27	1361.80	218.97	6.609652
A2	97.93	2.51	21095.85	699.09	26.31	0.26	1361.80	293.79	5.433459

Tabla 38: resultados obtenidos para las alternativas estudiadas en el CU1.

9.2 Definición conceptual del proceso de montaje de un avión simplificado

Si con el primer caso de estudio planteado se considera probado que la metodología se puede implementar y utilizar para el diseño conceptual de un proceso de montaje, la intención al definir este segundo caso era dejar patente su utilidad para definir inicialmente la industrialización de un producto complejo del sector aeronáutico.

Para este caso de uso (abreviado como CU2), se han desarrollado 5 alternativas distintas para el proceso de montaje. Según se han completado las distintas etapas de la metodología, se han ido descartando varias alternativas por presentar aspectos no factibles o costes muy elevados. Finalmente se ha elegido una alternativa como la mejor gracias a la evaluación mediante lógica borrosa. En el segundo supuesto se ha evaluado cómo afectan algunos cambios al proceso.

9.2.1 Modelo del producto

Este segundo caso de estudio está orientado a la aplicación de la metodología para el diseño del proceso de montaje de una aeronave completa. Para ello, se ha requerido un modelo digital de ese producto. Se ha diseñado específicamente para el caso de estudio un producto inspirado, en cuanto a la geometría y las dimensiones, en el avión de carga modelo A400M de Airbus. La Figura 133 muestra el modelo digital creado, con parte de su árbol de componentes.

Se ha pretendido que el caso de estudio tenga una complejidad equivalente a posibles aplicaciones reales de la metodología, por lo que se consideró importante que el producto tuviera un número suficientemente alto de componentes. En total, el modelo presenta 44 piezas. Se debe tener en cuenta que, dado el nivel de detalle al que se enfoca la metodología, se aplicará a productos simplificados. En este caso, por ejemplo, los componentes del producto representan sencillamente las secciones más grandes del avión, y aunque se da por sentado que un modelo real habrá de comprender un número de componentes mucho mayor, se considera que la metodología puede resultar efectiva teniendo en cuenta únicamente las operaciones de unión entre componentes con unas dimensiones considerables.

En la Tabla 39 se han listado los componentes del modelo de producto empleado en este caso de uso. Se muestra en la primera columna sus Part numbers o denominación dentro del sistema, seguido de los nombres completos de las piezas. La Figura 134 muestra una vista explosionada del producto, con cada componente junto a una etiqueta con su Part number.

Figura 133: vista en perspectiva del modelo del producto del CU2.

Part number	Code	Part number	Code
CFU	Upper center fuselage	LWB1	Left wing body 1
CFL	Lower center fuselage	LWB2	Left wing body 2
FFB	Front fuselage back	LWF1	Left wing flat 1
FFL	Front fuselage low	LWF2	Left wing flat 2
FFU	Front fuselage up	LWF3	Left wing flat 3
RFF	Rear fuselage front	LWS1	Left wing slat 1
RFBL	Rear fuselaje back low	LWS2	Left wing slat 2
RFBU	Rear fuselaje back up	LWS3	Left wing slat 3
WB	Wing box	LWT	Left wing top
VSM	Vertical stabilizer medium	LFAN1	Left fan 1
VSF	Vertical stabilizer front	LFAN2	Left fan 2
VSR	Vertical stabilizer rear	RWB1	Right wing body 1
VSU	Vertical stabilizer up	RWB2	Right wing body 2
HSCB	Horizontal stabilizer center back	RWF1	Right wing flat 1
HSLM	Horizontal stabilizer left medium	RWF2	Right wing flat 2
HSLF	Horizontal stabilizer left front	RWF3	Right wing flat 3
HSLR	Horizontal stabilizer left rear	RWS1	Right wing slat 1
HSLL	Horizontal stabilizer left lateral	RWS2	Right wing slat 2
HSRM	Horizontal stabilizer right medium	RWS3	Right wing slat 3
HSRF	Horizontal stabilizer right front	RWT	Right wing top
HSRR	Horizontal stabilizer right rear	RFAN1	Right fan 1
HSRL	Horizontal stabilizer right lateral	RFAN2	Right fan 2

Tabla 39: lista de componentes y nomenclatura del producto del caso de estudio 2.

Figura 134: vista explosionada del producto del caso de estudio 2 con códigos de componentes.

9.2.2 Condiciones iniciales

La aplicación de la metodología requiere una información de partida relativa, principalmente, al modelo concreto de procesos y recursos, las uniones definidas entre los componentes del producto y la información logística (distancias y datos de los medios de transporte y de las plantas disponibles). A continuación se describe cada una.

9.2.2.1 Diccionario PRD

Se ha utilizado el mismo diccionario PRD que en el CU1. En realidad, ese modelo de recursos y procesos se creó para posibilitar casos de estudio tanto del montaje de componentes aeronáuticos como de productos completos. La Tabla 34 de la sección anterior es un extracto del diccionario PRD usado en los casos de estudio que se presentan.

9.2.2.2 Uniones entre componentes

Es necesario también que haya unas uniones entre componentes definidas, y con tipos contemplados en el diccionario PRD asociados. De esa forma se pueden determinar las operaciones de montaje que serán necesarias. Debe haber un número de uniones suficiente para que todos los componentes estén conectados al conjunto.

En este caso se ha definido el número mínimo posible de uniones, es decir, tantas como componentes del producto existen, menos una. Forman un bucle de cadena abierta, de forma que sólo se puede llegar de un componente a otro, pasando por las uniones definidas, mediante un único camino. La Tabla 40 recoge las 43 uniones definidas en el producto, junto con los dos componentes que relaciona, su tipo de unión y el número de elementos que incluye (número de taladros o remaches que requiere esa unión). Las abreviaturas del tipo de unión FF, FW y CC significan, respectivamente “Fuselage-Fuselage”, “Fuselage-Wing box” y “Composite Components”.

	Comp. 1	Comp. 2	Type	N El.s		Comp. 1	Comp. 2	Type	N El.s
Joint 1	CFU	CFL	FF	81	Joint 23	HSRM	HSRL	CC	5
Joint 2	CFU	FFB	FF	35	Joint 24	LWB1	LWB2	CC	20
Joint 3	FFB	FFL	FF	35	Joint 25	LWB1	LWF1	CC	22
Joint 4	FFU	FFL	FF	63	Joint 26	LWB1	LWF2	CC	22
Joint 5	CFL	RFF	FF	38	Joint 27	LWB1	LWS1	CC	18
Joint 6	RFB1	RFF	FF	24	Joint 28	LWB1	LWS2	CC	18
Joint 7	RFB1	RFB2	FF	33	Joint 29	LWB1	LFAN1	CC	7
Joint 8	WB	LWB1	FW	32	Joint 30	LWB2	LWF3	CC	19
Joint 9	WB	CFU	FW	94	Joint 31	LWB2	LWS3	CC	15
Joint 10	WB	RWB1	FW	32	Joint 32	LWB2	LWT	CC	6
Joint 11	RFB2	VSM	FW	27	Joint 33	LWB2	LFAN2	CC	7
Joint 12	VSM	VSF	CC	87	Joint 34	RWB1	RWB2	CC	20
Joint 13	VSM	VSR	CC	85	Joint 35	RWB1	RWF1	CC	22
Joint 14	VSM	VSU	CC	37	Joint 36	RWB1	RWF2	CC	22
Joint 15	VSU	HSCB	CC	62	Joint 37	RWB1	RWS1	CC	18
Joint 16	HSCB	HSLM	CC	34	Joint 38	RWB1	RWS2	CC	18
Joint 17	HSLM	HSLF	CC	27	Joint 39	RWB1	RFAN1	CC	7
Joint 18	HSLM	HSLR	CC	28	Joint 40	RWB2	RWF3	CC	19
Joint 19	HSLM	HSLL	CC	5	Joint 41	RWB2	RWS3	CC	15
Joint 20	HSCB	HSRM	CC	34	Joint 42	RWB2	RWT	CC	6
Joint 21	HSRM	HSRF	CC	27	Joint 43	RWB2	RFAN2	CC	7
Joint 22	HSRM	HSRR	CC	28					

Tabla 40: lista de uniones del producto del caso de estudio 2 y sus propiedades.

9.2.2.3 Información Logística

La información requerida para la definición de la red logística utilizada en este caso de estudio ha sido la misma que se empleó en el primero. Se trata principalmente de tablas de distancias o tiempos para el transporte entre las localizaciones de las plantas disponibles, según el medio empleado, así como de características de los medios estudiados, como capacidad de carga, velocidad media o el consumo. Dicha información se ha incluido en la Tabla 65 de la sección 13.4 de los Anexos.

9.2.3 Supuesto 1: Selección de la mejor alternativa para el proceso de montaje

La primera parte del CU2 ha consistido en la determinación de la mejor alternativa para el diseño del proceso de montaje entre cinco posibles. Al comienzo se definieron 5 alternativas distintas ya desde la estructura de sus vistas As Planned asociadas. En total se ha estudiado 5 alternativas diferentes, que se describen a continuación.

9.2.3.1 Alternativas estudiadas

Las 5 alternativas estudiadas en el caso difieren principalmente en la estructura de su vista As Planned del producto. En el resto de aspectos, se ha procurado definirlas de la misma manera, de forma que el auténtico aspecto diferenciador sea la vista As Planned. Así se podrá determinar cuál es la configuración más adecuada para la vista As Planned. Para continuar mejorando la solución que salga ganadora, se podría subdividirla en otras en etapas posteriores, como la secuenciación de uniones o la definición de estaciones. Sin embargo esta primera parte del CU2 no va tan lejos, termina con la determinación de la mejor opción entre las 5 definidas.

A continuación se describirá cada alternativa brevemente. Se incluirá una imagen con los distintos submontajes separados por colores, junto con su árbol de componentes de CATIA V5. En las tablas se muestra la estructura de la vista As Planned de las distintas alternativas.

9.2.3.1.1 Alternativa A1

La primera alternativa, denominada A1, destaca por tener una vista As Planned con un único nodo, el avión completo, al que están el resto de componentes directamente unidos. Se ha incluido esta opción porque, en cuanto a transporte, es muy ventajosa dado que no lo requiere: todas las operaciones se realizarían en la misma planta. La Tabla 41 recoge la estructura del As Planned, con todos los componentes al mismo nivel.

Aircraft																																							
WB	FFL	FFU	FFB	CFL	CFU	RFBL	RFBU	RFF	RWT	RWF3	RWS3	RWB2	RWF2	RWF1	RWS2	RWS1	RWB1	LWT	LWF3	LWS3	LWB2	LWF2	LWF1	LWS2	LWS1	LWB1	VSU	VSR	VSF	VSM	HSRL	HSRR	HSRF	HSRM	HSLL	HSLR	HSLF	HSLM	HSCB

Tabla 41: estructura de componentes del As Planned de la alternativa A1 del CU2.

9.2.3.1.2 Alternativa A2

La vista As Planned de la alternativa A2 presenta un nivel más, con 7 submontajes de componentes. La Figura 135 muestra una vista explosionada del producto organizado según el As Planned. Dicha estructura de componentes se presenta en la Tabla 42.

El montaje del producto, según esta alternativa, se distribuirá en 8 nodos industriales, correspondientes a los submontajes que presenta la vista As Planned: en los distintos nodos se ensamblará el estabilizador horizontal (granate en la Figura 135), el vertical (amarillo), el ala izquierda (verde), la derecha (azul), la sección de cola (en color rojo), el fuselaje central (marrón), el delantero (naranja) y, en otro nodo distinto, el avión completo, ensamblando entre sí los submontajes producidos en los nodos anteriores. La línea de montaje del producto completo se conoce como Línea de montaje final (siglas FAL en inglés).

Aircraft																																						
Horizontal Stabilizer				Vertical Stabilizer		Left Wing				Right Wing				Rear Section		Center Fus.		Nose Fus.		WB	LFAN1	LFAN2	RFAN1	RFAN2														
HSCB	HSIM	HSIF	HSIR	HSLL	HSRM	HSRL	HSRR	HSRR	HSRR	VSM	VSR	VSR	LWB1	LWB2	LWS1	LWS2	LWS3	LWF1	LWF2	LWF3	LWT	RWB1	RWB2	RWS1	RWS2	RWS3	RWF1	RWF2	RWF3	RWT	RFF	RFBU	RFB	CFU	CFL	CFU	FFU	FFL

Tabla 42: estructura de componentes del As Planned de la alternativa A2 del CU2.

Figura 135: vista explosionada del As Planned de la alternativa A2 del CU2.

9.2.3.1.3 Alternativa A3

La alternativa A3 presenta una variación respecto a la A2 en cuanto a la estructura de su vista As Planned. En este caso, la fabricación de algunos sub montajes que se ensamblaban en una única planta se ha distribuido en varias. La Tabla 43 muestra la estructura del As Planned.

Así, cada ala (en colores verde y azul oscuro en la Figura 136) se compone de dos nuevos sub montajes, el ala interior (en tono más claro en la figura) y el exterior (en tono más oscuro); y el estabilizador horizontal (en color púrpura) se compone de su sección izquierda (granate), su sección derecha (rojo) y un componente central.

Aircraft																								
Horizontal Stabilizer				Vertical Stabilizer		Left Wing				Right Wing				Rear Section	Center Fus.		Nose Fus.	WB	LFAN1	RFAN1	LFAN2	RFAN2		
HSCB	HStab_Left		HStab_Right		VSM	VSF	VSR	VSU	LWInner		LWOuter		RWInner		RWOuter		RFF	RFBU	RFBL	FFB	CFL	CFU	FFU	FFL

Figura 137: vista explosionada del As Planned de la alternativa A4 del CU2.

9.2.3.1.4 Alternativa A4

El As Planned de la alternativa A4 presenta los mismos submontajes de bajo nivel que la A3 (estabilizador horizontal izquierdo y derecho, alas interiores y exteriores), pero en este caso son hijos directos del conjunto principal, por lo que de nuevo se trata de una estructura con 2 niveles de sub montajes. La Tabla 44 recoge dicha estructura.

La Figura 137 incluye los distintos sub montajes en distintos colores: las secciones izquierda y derecha del estabilizador horizontal (en rojo y granate, respectivamente), el estabilizador vertical (en amarillo), las secciones interiores y exteriores de las alas izquierda y derecha (en colores verde y azul claros y oscuros, respectivamente) y el fuselaje frontal (naranja). Este último incluye su componente trasero, que en otras alternativas pertenecía al fuselaje.

[illegible]

Tabla 44: estructura de componentes del As Planned de la alternativa A4 del CU2.

9.2.3.1.5 Alternativa A5

La alternativa A5 se ha definido con un As Planned de estructura diferente a las descritas anteriormente, que incluye un sub montaje formado por las alas y el fuselaje central. Este As Planned no tiene demasiado sentido, dado que el mencionado sub montaje es demasiado grande para y su transporte será muy costos (aunque no imposible, dado que existe un medio, el barco de carga convencional, con capacidad sobrante para transportar varias unidades de este producto intermedio). Esta alternativa se ha definido para comprobar el comportamiento del sistema implementado y la respuesta obtenida al aplicar la metodología a una opción factible aunque a todas luces inadecuada.

La Tabla 45 presenta la estructura de la vista As Planned de la alternativa, y la Figura 138 muestra los sub montajes que comprende en distintos colores. El sub montaje definido por las alas y el fuselaje aparece en naranja, e incluye otros 3 sub montajes: las dos alas y el fuselaje central. Los otros sub montajes son el fuselaje delantero, el estabilizador vertical y el horizontal (en azul, verde y rojo, respectivamente).

Figura 138: vista explosionada del As Planned de la alternativa A5 del CU2.

Aircraft																													
Horizontal Stabilizer				Vertical Stabilizer		Body & Wings										Front Fus.		RFF	RFBU	RFB	LFAN1	LFAN2	RFAN1	RFAN2					
						Left Wing					Right Wing					Fuse-lage	FFL	FFU	FFB										
																WB	CFL	CFU											
																RWT	RWF3	RWS3	RWB2	RWF2	RWF1	RWS2	RWS1	RWB1					

Tabla 45: estructura de componentes del As Planned de la alternativa A4 del CU2.

9.2.3.2 Asociación de condiciones iniciales

De entre las condiciones iniciales, como ya se ha comentado, el diccionario PRD es el mismo que para el caso CU1, por lo que sencillamente se ha seleccionado los mismos archivos de Excel, uno que contiene el diccionario de actividades y otro con el de recursos.

Se ha cargado también la vista As Designed del producto. De nuevo, dicho documento no presenta una estructura especial, sino que únicamente consiste en un sub montaje padre con el que todos los componentes están directamente relacionados. Con ello se cumplen las condiciones requeridas para el documento: que incluya a todos los componentes del modelo que se desea estudiar y que éstos estén correctamente posicionados.

En cuanto a las uniones entre componentes, ha sido necesario generar un nuevo documento de tipo CATProcess con la información correspondiente (nombre de cada unión, componentes, tipo de unión y número de elementos) en el formato adecuado (cada unión representada por una actividad, los componentes asociados como productos y las propiedades como atributos de la actividad). Dicho documento se ha creado mediante la funcionalidad definida para ello, como ya se hizo en el primer caso (ver Figura 116).

9.2.3.3 Definición de estructuras As Planned

Cuando ya se ha asociado a la solución en desarrollo las condiciones iniciales, se desbloquea la posibilidad de definir la estructura de la vista As Planned del producto. En el CU2 esta estructura de producto varía con cada alternativa. En realidad, esta primera parte del caso, es decir, el supuesto 1, tiene como objetivo la determinación de la mejor alternativa entre un grupo que varían fundamentalmente en sus estructuras As Planned.

Para cada una de las alternativas estudiadas, se ha generado un documento de tipo CATProduct con la estructura de su As Planned definido, mediante la funcionalidad de la metodología correspondiente a dicho paso, de manera análoga a como se procedió en el CU1.

9.2.3.4 Optimización de la logística

Tras ejecutar el paso anterior, cada alternativa ya tenía una vista As Planned definida, por lo que las siguientes etapas quedaban desbloqueadas. En este punto de la ejecución de la metodología se puede elegir entre la optimización automática de la logística o la definición de las líneas de montajes de los distintos nodos industriales de cada alternativa.

Al igual que en el CU1, se ha optado por ejecutar primero la optimización de la logística, con la idea de que se defina información como el nivel de salarios en cada nodo industrial o la superficie disponible para su línea de montaje. De nuevo, cuando se complete la etapa siguiente y se haya definido todas las líneas de montaje, se deberá volver a ejecutar esta optimización automática, para comprobar que la primera configuración hallada continúa siendo factible, dado que se habrá actualizado la superficie requerida para cada línea de montaje y el tiempo de ciclo de cada alternativa.

La Tabla 46 muestra extractos de la solución obtenida para cada alternativa. Por motivos de espacio, únicamente se ha incluido la información relativa a los nodos industriales y el coste total, y se ha omitido la de los nodos de la red correspondientes al origen de los componentes individuales. Todos los datos están referidos a un ciclo de producción (el tiempo que se tardaría en completar la estación más larga de todo el proceso). En la sección 13.4.1 de los Anexos se incluyen las tablas enteras con los resultados de este paso.

Este paso puede usarse para discriminar alternativas de forma rápida, por ejemplo si no tienen ninguna posible solución factible para su distribución logística o el coste total es demasiado alto. En este caso de estudio se ha descartado en este punto la alternativa A5. El peso del sub montaje “Body & Wings” hace que las únicas soluciones factibles sean aquéllas en las que la línea asociada a dicho nodo tenga la misma ubicación que la del nodo siguiente, por lo que esa configuración es equivalente en cuanto a la logística a la de la alternativa A2, pero requerirá una línea separada (aunque en la misma localización). En definitiva, requerirá más superficie de la planta y no supone ninguna ventaja respecto a la alternativa A2. Las últimas 9 filas de la Tabla 46 muestran un extracto de la solución obtenida para la red logística de la alternativa A5.

En cuanto al resto de alternativas, se ha decidido no eliminar ninguna más, aunque los resultados en cuanto al coste total son muy distintos, también hay que tener en cuenta que se trata de una optimización multicriterio que tiene en cuenta otros factores distintos al coste que son difíciles de evaluar en este punto. Además esta definición se ha hecho en un punto en el que la mayoría del proceso no está definida, y el coste puede variar mucho al realizar la segunda definición, más adelante. Por esas razones no se debería descartar ninguna alternativa sólo por su coste de transporte excepto si se tratase de una cantidad prohibitiva.

Casos de estudio

	NODE OF THE NETWORK	LOCATION	MEAN	COST (€)	N	Ut (h)
A1	Plant for Aircraft1	Puerto Real, Sp		-		
	TOTAL COST (€)			454250,13		
A2	Plant for Aircraft1	Puerto Real, Sp		-		
	Plant for H. Stab	Bristol, UK	CS6500TEU,	36674,12	29	0,37
	Plant for V. Stabr	Laupheim, Ge	Truck,	8154,93	3	0,12
	Plant for Left Wing	Nantes, Fr	Truck,	8385,47	2	0,08
	Plant for R. Wing	Nantes, Fr	Truck,	8390,13	2	0,08
	Plant for Nose Fus.	Nantes, Fr	Truck,	6112,06	3	0,08
	Plant for Rear Sect.	Laupheim, Ge	Truck,	16709,37	1	0,12
	Plant for Fuselage	Puerto Real, Sp		-		
	TOTAL COST (€)			218504,29		
A3	Plant for Aircraft1	Puerto Real, Sp		-		
	Plant for H. Stab	Nantes, Fr	Truck,	4715,25	5	0,08
	Plant for V. Stabr	Nantes, Fr	Truck,	5585,00	3	0,08
	Plant for Left Wing	Nantes, Fr	Truck,	8385,47	2	0,08
	Plant for R. Wing	Laupheim, Ge	Truck,	12427,78	2	0,12
	Plant for Fuselage	Puerto Real, Sp	Truck,	16709,37	1	0,12
	Plant for Rear Sect.	Laupheim, Ge	Truck,	8924,51	3	0,12
	Plant for Nose Fus.	Laupheim, Ge	CS6500TEU,	18848,54	29	0,15
	Plant for LWInner	Bristol, UK	Truck,	700,06	9	0,02
	Plant for LWOuter	Hamburg, Ge	Truck,	3043,60	4	0,04
	Plant for RWInner	Hamburg, Ge	BCG_AB,	16847,15	28	0,96
	Plant for RWOuter	Nordenham, Ge	Truck,	14962,17	1	0,08
	Plant for HStab_Right	Brighton, UK	BCG_AB,	5034,05	29	0,37
	Plant for HStab_Left	Nordenham, Ge	Truck,	5132,55	3	0,06
	TOTAL COST (€)			275764,27		
A4	Plant for Aircraft1	Puerto Real, Sp		-		
	Plant for LWInner	Puerto Real, Sp		-		
	Plant for LWOuter	Nantes, Fr	Truck,	3903,89	6	0,08
	Plant for RWInner	Nantes, Fr	Truck,	5443,06	4	0,08
	Plant for RWOuter	Nantes, Fr	Truck,	3909,41	6	0,08
	Plant for V. Stab.	Hamburg, Ge	Truck,	9086,52	3	0,14
	Plant for HStab_Left	Bristol, UK	CS6500TEU,	28091,50	29	0,35
	Plant for HStab_Right	Brighton, UK	CS6500TEU,	31547,99	29	0,39
	Plant for Front Fus.	Hamburg, Ge	Truck,	13467,03	2	0,14
	TOTAL COST (€)			367618,82		
A5	Plant for Aircraft1	Puerto Real, Sp		-		
	Plant for Body & Wings	Puerto Real, Sp		-		
	Plant for H. Stab.	Laupheim, Ge	Truck,	6710,12	5	0,12
	Plant for V. Stab.	Laupheim, Ge	Truck,	8154,93	3	0,12
	Plant for Front Fus.	Nantes, Fr	Truck,	8133,81	2	0,08
	Plant for Fuselage	Nantes, Fr	CS6500TEU,	52224,58	29	0,28
	Plant for Left Wing	Nantes, Fr	Truck,	8385,47	2	0,08
	Plant for R. Wing	Brighton, UK	CS6500TEU,	46321,62	28	0,41
	TOTAL COST (€)			266166,9513		

Tabla 46: solución obtenida para la distribución logística de la alternativa A3 del CU2.

9.2.3.5 Secuenciación de las uniones del producto

El siguiente paso que se ha seguido tras la obtención de soluciones de la distribución logística ha sido la definición de la línea de montaje de cada nodo industrial de las alternativas. Se ha comenzado, para ello, secuenciando las uniones asociadas a cada nodo. Dado que la principal diferencia entre las alternativas es la estructura de la vista As Planned, las siguientes etapas se han tratado de completar de manera análoga, de forma que las diferencias en los resultados se puedan asociar directamente a la configuración de dicha vista de cada caso.

Figura 139: definición de la secuencia de uniones para la FAL de la alternativa A1.

Como ejemplo representativo de la ejecución de este paso, se presenta la aplicación a la alternativa A1. La secuenciación de las uniones para esta alternativa es interesante porque es la que presenta el mayor número de uniones en un único nodo industrial, dado que se definió su estructura As Planned de esa forma.

La Figura 139 muestra el uso de la interfaz para definir la secuenciación en la alternativa A1. Se puede observar que el número de uniones es muy elevado, por lo que se requiere cierto tiempo, además de una idea inicial acerca de cómo disponer la línea de montaje. Al preseleccionar cada unión de la lista, se muestran los componentes que intervienen o, en el caso de haber pulsado “Set Sequence” para generar una secuenciación de prueba, los sub montajes en los que se encuentran.

Al pulsar “Apply” se genera automáticamente un nuevo producto, en el que los componentes están estructurados siguiendo la vista As Prepared definida por la secuencia de uniones. Este producto se debe examinar previamente antes de pulsar “Create”, cuando se crearán por defecto unas estaciones que contengan las uniones implicadas en el nodo industrial. El sistema genera una estación por cada grupo de uniones que se ejecutan de forma simultánea.

La Tabla 47 y la Tabla 48 recogen la secuencia de uniones definida para la alternativa A1, y las uniones en las que se distribuyen por defecto. Además, en la columna derecha se incluye el sub montaje que se generaría al término de las operaciones de cada estación. Se ha destacado algunos de sus componentes internos para una mejor representación. Las estaciones adquieren un nombre por defecto que puede ser de la forma “WS_SimultaneousJointsGroup” + número o “WS_Joint” + número según si engloban a una única unión o un grupo de uniones simultáneas, respectivamente. Los sub montajes que se crean en cada grupo de una o varias uniones, en caso de no existir dentro de la estructura anterior As Planned (con lo que tendrían ya un nombre), se denominan automáticamente como “Complex Assemblies”.

Por ejemplo, en la cuarta fila de la Tabla 47, se muestra la estación preliminar “WS_SimultaneousJointsGroup4”, que incluye las uniones J2 y J5 y obtiene como resultado el producto “Complex Assembly n3”, al unir los sub montajes “Complex Assembly n4”, “n5” y “n6” (abreviados en la tabla como “CA4”, “CA5” y “CA6”).

Casos de estudio

Al pulsar “Create” se incluyen las estaciones por defecto en el documento CATProcess activo. A cada estación se asocia el producto correspondiente, de entre los recientemente generados al crear la estructura As Prepared. La Figura 140 muestra las 17 estaciones creadas por el sistema al completar este paso con la alternativa A1, y el despliegue de la última de ellas, con los productos intermedios que se plantean unir asociados.

Como comparación entre alternativas, se incluye la Tabla 49, que muestra las estaciones, uniones que engloban y productos intermedios de la línea de montaje final de la alternativa A2. La Figura 141 muestra el despliegue de la segunda estación, con los productos entrantes asociados. Al haber menos uniones asociadas al nodo industrial de esa alternativa, la secuenciación de uniones es más sencilla, y la línea resultante, más compacta.

STATION NAME	JOINTS & COMP.S	PRODUCED SUB ASSEMBLY
WS_SimultaneousJointsGroup1	J1 y J9 (CA4): WB+CFU+CFL	
WS_SimultaneousJointsGroup2	J6 y J7 (CA6): RFBU+RFB+RFF	
WS_SimultaneousJointsGroup3	J4 y J3 (CA5): FFU+FFL+FFB	
WS_SimultaneousJointsGroup4	J5 y J2 (CA3): CA4+CA5+CA6	
WS_SimultaneousJointsGroup5	J12 y J13 (CA13): VSR+VSF+VSM	
WS14_Joint14	J14 (SJ14): CA13+VSU	
WS_SimultaneousJointsGroup6	J16, J17, J20 y J21 (CA15): HSRF+HSLM+ HSCB+HSLF+HSRM	
WS_SimultaneousJointsGroup7	J18, J19, J22 y J23 (CA14): CA15+HSRL+ HSLR+HSL+HSRR	
WS15_Joint15	J15 (SJ15): SJ14+CA14	

Tabla 47: estaciones, uniones que incluyen y sub montajes asociados de la FAL de la alternativa A1 del CU2.

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

STATION NAME	JOINTS & COMP.S	PRODUCED SUB ASSEMBLY
WS_SimultaneousJointsGroup8	J24, J25 y J27 (CA9): LWB1+LWB2+ LWF1+LWS1	
WS_SimultaneousJointsGroup9	J26 y J28 (CA8): CA9+LWF2+LWS2	
WS_SimultaneousJointsGroup10	J30, J31 y J2 (CA7): CA8+LWT+LWS3+ LWF3	
WS_SimultaneousJointsGroup11	J34, J35 y J37 (CA12): RWB1+RWB2+ RWF1+RWS1	
WS_SimultaneousJointsGroup12	J36 y J38 (CA11): CA12+RWF2+ RWS2	
WS_SimultaneousJointsGroup13	J40, J41 y 42 (CA10): CA11+RWT+ RWS3+RWF3	
WS_SimultaneousJointsGroup14	J8, J10 y J11 (CA2): SJ15+CA3+CA7+ CA10	
WS_SimultaneousJointsGroup15	J29, J33, J39 y J43 (CA1): LFAN1+LFAN2+ RFAN1+RFAN2+ CA2	

Tabla 48: estaciones, uniones que incluyen y sub montajes asociados de la FAL de la alternativa A1 del CU2 (continuación).

Figura 140: listado de estaciones con zoom en la última de la FAL de la alternativa A1 del CU2.

STATION NAME	JOINTS & COMP.S	PRODUCED SUB ASSEMBLY
WS_SimultaneousJointsGroup1	J3 y J5 (CA4): R.Sect.+ Fus + Nose Fus.	
WS_SimultaneousJointsGroup2	J9 y J11 (CA3): CA4+V.Stab+WB	
WS_SimultaneousJointsGroup3	J8, J10 y J15 (CA2): H.Stab+CA3+ L.Wing+R.Wing	
WS_SimultaneousJointsGroup4	J29, J33, J39 y J43 (CA1): LFAN1+LFAN2+ RFAN1+RFAN2+ CA2	

Tabla 49: estaciones, uniones que incluyen y sub montajes asociados de la FAL de la alternativa A2 del CU2.

Figura 141: listado de estaciones con zoom en la segunda de la FAL de la alternativa A2 del CU2.

En cuanto al resto de alternativas, la Tabla 50 recoge las secuencias de uniones de los nodos industriales de todas ellas, excepto de A5, que se había descartado previamente. Se incluye el nombre de cada alternativa, los nodos industriales que presenta, y la secuencia de uniones definida para cada uno en esta etapa. Como se verá más adelante, en aquellas alternativas con plantas que incluyan un número muy elevado de uniones, surgirán problemas relacionados con la superficie disponible en las instalaciones que se deben asignar. Por otra parte si existe un alto número de nodos que requiera muchas plantas, el coste del transporte será mayor. Las mejores soluciones requerirán un equilibrio entre ambos aspectos.

9.2.3.6 Definición de estaciones

Después de la generación automática de unas estaciones por defecto en cada línea de montaje según la secuencia de uniones definida, la metodología establece que se dispongan las estaciones definitivas. En esta etapa se permite la creación de nuevas estaciones y el traspaso de operaciones entre las existentes. Como indicaciones, la interfaz desarrollada muestra una estimación del tiempo de ciclo en la línea de montaje, según las estaciones existentes y sus operaciones asignadas en ese momento.

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

INDUSTRIAL NODE		JOINTS SEQUENCE
A1	FAL	J1,J9→J6,J7→J3,J4→J2,J5→J12,J13→J14→J16,J17,J20,J21→J18,J19,J22,J23→J15→J24,J25,J27→J26,J28→J30,J31,J32→J34,J35,J37→J36,J38→J40,J41,J42→J8,J10,J11→J29,J33,J39,J43
A2	FAL	J3, J5→J9, J11→J8, J10, J15→J29, J33, J39, J43
	Assembly of Nose Fuselage	J4
	Assembly of Fuselage	J1→J2
	Assembly of Rear Section	J6→J7
	Assembly of Horizontal Stabilizer	J16, J20→J17, J21→J18, J19, J22, J23
	Assembly of Vertical Stabilizer	J12, J23→J14
	Assembly of Right Wing	J34, J35, J37→J36, J38→J40, J41, J42
	Assembly of Left Wing	J24, J25, J27→J26, J28→J30, J31, J32
A3	FAL	J3, J5→J9, J11→J8, J10, J15→J29, J33, J39, J43
	Assembly of H. Stab	J16, J20
	Assembly of HStab_Right	J17, J18, J19
	Assembly of HStab_Left	J21, J22, J23
	Assembly of V. Stabr	J12, J13→J14
	Assembly of Left Wing	J24
	Assembly of LWInner	J25, J27→J26, J28
	Assembly of LWOuter	J30, J31→J32
	Assembly of Right Wing	J34
	Assembly of RWInner	J35, J37→J36, J38
	Assembly of RWOuter	J40, J41→J42
	Assembly of Fuselage	J1→J2
	Assembly of Rear Sect.	J6→J7
	Assembly of Nose Fus.	J4
A4	FAL	J1→J2,J5,J6→J7→J16,J20→J24→J34→J9,J11→J8,J10,J15→J29,J33,J39,J43
	Assembly ofLWInner	J25, J27→J26, J28
	Assembly ofLWOuter	J30, J31→J32
	Assembly ofRWInner	J35, J37→J36, J38
	Assembly ofRWOuter	J40, J41→J42
	Assembly ofV. Stab.	J12, J13→J14
	Assembly ofHStab_Left	J17, J18, J19
	Assembly ofHStab_Right	J21, J22, J23
	Assembly ofFront Fus.	J3,J4

Tabla 50: secuencias de uniones para los distintos nodos industriales de las alternativas del CU2.

Además, el sistema realiza de forma automática una primera asignación de operaciones a cada estación, según las uniones que incluya y las operaciones de montaje que éstas impliquen, definidas en el diccionario PRD. Tras ello, ese realiza un repaso en el que se propone eliminar todas aquellas operaciones que puedan estar repetidas, debido a incluir varias uniones con tipos de actividades similares. También se identifica el producto que es sujeto de cada operación de montaje, siguiendo la propiedad “Subject” del tipo de actividad compuesta que contenga la instancia concreta de la operación (por ejemplo la Unión tipo “Part – Part” incluye una primera actividad de posicionamiento en el utillaje del producto definido como “Heaviest”, por lo que se tratará del más pesado entre los dos componentes asignados a la unión). Por último, al pulsar el botón de aplicar, se crea de manera automática la estructura de procesos definida, es decir, las estaciones y operaciones de montaje

Para las alternativas del caso de estudio que se presenta, en las líneas de montaje finales no se ha utilizado las funcionalidades interactivas incluidas en la interfaz para esta etapa. Es decir, se han mantenido las estaciones que el sistema ha generado en la etapa anterior para esas líneas. Sí que se ha optado por eliminar todas las actividades repetidas. Para las líneas de productos intermedios se ha empleado la funcionalidad de traspasar operaciones a estaciones posteriores, de forma que el cambio iguale los tiempos de ejecución de las distintas estaciones. Para ninguna alternativa se ha añadido ninguna estación nueva.

9.2.3.7 Gestión de recursos y operaciones

La tercera etapa del bloque para la definición de las distintas líneas de montaje implica la asignación de unos recursos concretos a las operaciones, una variante en caso de que se hayan mantenido abiertas y el número de turnos de trabajo de cada estación. El número de turnos permite que una determinada estación produzca más durante cada jornada, con lo que su tiempo de finalización equivalente se reduce, a costa de aumentar el coste debido al número de recursos asignados y al sueldo mayor de los trabajadores por ser horas nocturnas.

En el caso CU2 se ha empleado para la asignación de recursos la funcionalidad desarrollada para la obtención de tiempos menores, excepto para las estaciones que requirieran un menor tiempo, para las que se ha escogido la opción que minimiza el coste. Posteriormente, en cada línea, a las estaciones que presentaran tiempos demasiado altos se les ha asignado doble o triple turno. Como ya se ha comentado, dichos valores de tiempos y costes son meras estimaciones, dado que en este punto aún no se ha asignado los recursos definitivos.

La Tabla 51 recoge la información obtenida en este paso en las distintas alternativas. Cabe destacar que para la alternativa A1 no se ha completado la etapa, y para la alternativa A4 únicamente se ha ejecutado para su FAL. Ello se debe a que ambas alternativas se han descartado al definir la distribución en planta de la línea final de la alternativa A4. Para dicho nodo industrial, se definió su distribución inmediatamente después de la asignación de recursos. Debido a su elevado número de estaciones, el espacio que requería era mayor que el disponible en ninguna de las plantas existentes. Dado que la alternativa A1 requiere un mayor espacio para su FAL que la A4, también quedó descartada. Se comenzó definiendo la línea de montaje de la alternativa A4 en lugar de otras porque ya se sospechaba que podría no ser factible. En la sección 0 se explicará con más detalle la manera en que se han descartado las dos alternativas.

Sin embargo, la asignación automática de recursos basándose en minimizar el tiempo a menudo asigna recursos con capacidades distintas, según los requisitos, a actividades que necesitan el mismo tipo de recursos y que de otra forma los podrían compartir. Por esta razón se ha procedido a asignar el recurso con mayor capacidad a todas las operaciones de cada estación que requirieran uno de ese tipo, de manera compartida.

En la primera estación de la alternativa A2, por ejemplo, las dos mitades del fuselaje se desplazan y posicionan gracias a una grúa con capacidad de 15 Toneladas, dado que, por separado, ambos componentes no superan dicho peso. Sin embargo, una vez ensamblados el peso total es de 16483 kg, por lo que dicho recurso no es suficiente para las actividades de movimiento del final de la estación. Por eso para esas últimas, el sistema ha asignado una grúa con capacidad de 40 Tm.

Es posible gestionar los recursos asignados desde CATIA, por lo que sería posible desasignar el recurso de capacidad inferior, y asignar el otro a todas las actividades necesarias, con lo que se reduciría el número de recursos necesarios y el coste.

En este caso particular, sin embargo, las características del utillaje seleccionado y de los productos que se ensamblan (entre otros el fuselaje central, que incluye el tren de aterrizaje, lo que aporta un sistema de ruedas estable al conjunto), es posible realizar operaciones de transporte mediante un recurso consistente en un carro de arrastre. Además, la operación de "Retire from jig" no requiere de recursos mecánicos, dado que el utillaje diseñado se separa de manera automática.

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

	INDUSTRIAL NODE	St	Opti- mized	N Shifts	Time (s)
A1	FAL				
A2		WS1	Time	2	23,19
	FAL	WS2	Time	3	43,62
		WS3	Time	3	39,10
		WS4	Time	1	19,52
	A. of Nose Fus.	WS1	Time	2	37,25
	A. of Fuselage	WS1	Time	2	30,52
		WS2	Time	1	43,00
	A. of Rear Sect.	WS1	Time	2	30,52
		WS2	Time	1	43,00
	A. of H. Stab.	WS1	Time	2	29,39
		WS2	Cost	2	30,67
		WS3	Cost	2	31,69
	A. of V. Stab.	WS1	Time	3	39,31
		WS2	Cost	2	40,90
	A. of Right Wing	WS1	Time	1	39,12
		WS2	Time	1	43,54
		WS3	Time	1	38,36
	A. of Left Wing	WS1	Time	1	39,12
		WS2	Time	1	43,54
		WS3	Time	1	38,36

	INDUSTRIAL NODE	St	Opti- mized	N Shifts	Time (s)
A3		WS1	Time	2	23,19
	FAL	WS2	Time	3	43,62
		WS3	Time	3	39,10
		WS4	Time	1	19,52
	A. of H. Stab	WS1	Cost	2	39,89
	A. of HStab_Right	WS1	Cost	2	31,38
	A. of HStab_Left	WS1	Cost	2	31,38
	A. of V. Stab	WS1	Time	3	39,31
		WS2	Cost	2	40,90
	A. of Left Wing	WS1	Time	1	40,09
	A. of LWInner	WS1	Cost	2	22,56
		WS2	Cost	2	22,56
	A. of LWOuter	WS1	Time	1	38,05
		WS2	Cost	1	43,15
	A. of Right Wing	WS1	Time	1	40,09
	A. of RWInner	WS1	Cost	2	22,56
		WS2	Cost	2	22,56
	A. of RWOuter	WS1	Time	1	38,05
		WS2	Cost	1	43,15
	A. of Fuselage	WS1	Time	2	30,52
		WS2	Time	1	43,00
	A. of Rear Sect.	WS1	Time	2	30,52
		WS2	Time	1	43,00
	A. of Nose Fus.	WS1	Time	2	37,25
A4		WS1	Time	3	31,68
		WS2	Time	2	24,18
		WS3	Time	1	41,22
		WS4	Time	2	37,99
	FAL	WS5	Time	1	40,78
		WS6	Time	1	40,78
		WS7	Time	3	44,14
		WS8	Time	3	39,91
		WS9	Cost	1	28,34

Tabla 51: estimaciones de tiempos en la etapa de gestión de recursos y operaciones para el CU2.

Figura 142: asignación manual del carrito "ZTroll80" a la última operación de la primera estación de la FAL de la alternativa A1 del CU2.

Por lo tanto, sería posible asignar como recurso el carrito de arrastre para la actividad final de movimiento, no asignar ningún recurso para la de retirar del fuselaje, y mantener el recurso de menor capacidad en las primeras actividades. Para ello, sería necesario cargar un nuevo recurso de tipo “carrito” al proceso. Se debe hacer partiendo de un recurso existente de ese tipo y creando un nuevo archivo de tipo producto mediante la función “New from” de CATIA. De esa forma se mantienen los atributos incluidos por la aplicación dentro del producto, como las propiedades “Model”, “Cost” o “Life expectancy”.

Para la primera estación de la línea de montaje final de la alternativa A2 se han comparado las dos posibilidades descritas: asignar el recurso de mayor capacidad de forma compartida, o mantener el de menor para las primeras actividades y añadir un recurso de tipo “carrito”, más barato para el final de la estación. Se ha evaluado cada posibilidad mediante la evaluación intermedia de nodos industriales, el paso siguiente, y los resultados se muestran en la Tabla 52. Se observa que la opción consistente en asignar el recurso de tipo carrito obtiene mejores resultados en coste, tiempo y eficiencia, por lo que ha sido la elegida en esta situación y otras análogas surgidas al definir las líneas de montaje de otros nodos y otras alternativas.

Por último, ha sido necesaria la modificación de las actividades de cada línea de montaje debido a que aquéllas que comparten recursos no pueden ejecutarse de manera simultánea. Por ello, se han creado nuevas restricciones de precedencia entre operaciones que comparten recursos. Esta forma de proceder es análoga a la empleada en el caso de uso anterior, el CU1. La Figura 122 ya mostraba cómo se incluyeron nuevas restricciones de precedencia para compatibilizar el uso compartido de recursos.

Este paso no se ha completado de manera exhaustiva para todas las alternativas. Como se ha comentado, las alternativas A1 y A4, dado su alto número de estaciones en las líneas de montaje finales, se sospechaba que podían requerir una superficie mayor de la máxima utilizable en cualquiera de las plantas industriales disponibles. Por esa razón se ejecutaron las últimas etapas del bloque de forma rápida, para alcanzar el bloque de definición de la distribución en planta, y comprobar si el posicionamiento de sus elementos era factible o si por el contrario debían ser descartadas como alternativas.

Variant from A1 FAL	Node AL Cost (€)	Time (h)	Efficiency
Using BOBCK40000 at 1st station of FAL	52452.37	49.37	25.59%
Using BOBCK15000 and ZTroll80 at 1st station of FAL	51339.79	48.32	26.12%

Tabla 52: resultados obtenidos para las dos variantes de recursos planteadas para la FAL de la A2 del CU2.

Figura 143: generación interactiva en CATIA V5 de un nuevo recurso de un modelo dado.

Figura 144: modelo digital del recurso “ZTroll80”, de tipo “Transporter jig”.

Figura 145: propiedades del modelo de carrito definido, incluidas en su modelo digital diseñado en CATIA V5.

9.2.3.8 Evaluación intermedia de los nodos industriales

Cuando cada nodo de una determinada alternativa está totalmente definido, en cuanto a sus operaciones y a los recursos asignados, antes de proceder al posicionamiento de los elementos físicos (o distribución en planta) se debe ejecutar una evaluación intermedia de cada nodo. Los resultados obtenidos son más precisos que las estimaciones anteriores, pues ya se conocen los recursos concretos asignados, aunque no se pueden considerar definitivos, dado que la localización o planta en que se ubica el nodo puede variar o no estar aún definida.

Esta evaluación intermedia es un requisito impuesto en el sistema, y hace que el comando de inicio del bloque para la distribución en planta esté bloqueado si antes no se ha evaluado. Los resultados se exportan al documento general que está asociado a cada alternativa, desde el que se puede lanzar la evaluación final de todo el proceso de montaje.

Figura 146: visualizador de los resultados obtenidos para la FAL de la alternativa A2 del CU2.

Al lanzar la evaluación del nodo de la línea final de la alternativa A2, se comprobó que la última estación de la misma requería un tiempo mayor que el resto, algo que no se apreció en la etapa de gestión de recursos y operaciones por la baja precisión de los resultados en ese punto. Para compensarlo se modificó el número de turnos de la estación conflictiva, de 1 a 2. Con este cambio se obtuvo un coste mayor que el mostrado en la Tabla 52, y un menor tiempo de ciclo. La Figura 146 muestra los resultados en la interfaz diseñada para ello. Se trata de los obtenidos para la línea final de la alternativa A2. La Tabla 53 muestra los resultados obtenidos para los nodos de las alternativas A2 y A3.

	Industrial Node	Cycle Time (h)	U_{ct} (h)	Cost (€)	U_c (€)	Efficiency	U_{Eff}
A2	FAL	45,95	1,51	56244,83	348,83	24,36%	0,25%
	Assembly of Nose Fuselage	37,25	1,47	22913,59	318,56	13,3%	0,5%
	Assembly of Fuselage	43,93	1,65	11076,41	130,08	20,68%	0,58%
	Assembly of Rear Section	22,99	0,89	52274,25	547,76	14,84%	0,37%
	Assembly of H. Stabilizer	35	1,12	58545,74	387,15	24,6%	0,27%
	Assembly of V. Stabilizer	41,38	1,34	149451,68	1282,11	27,67%	0,51%
	Assembly of Right Wing	43,84	1,31	32010,56	198,47	30,66%	0,31%
	Assembly of Left Wing	43,84	1,31	32010,56	198,47	30,66%	0,31%
A3	FAL	45,95	1,51	56244,83	348,83	24,36%	0,25%
	Assembly of H. Stab	45,84	1,16	31471,91	263,41	19,25	0,35
	Assembly of HStab_Right	35,65	0,91	23126,68	196,99	25,51	0,37
	Assembly of HStab_Left	35,65	0,91	64101,83	546,95	25,55	0,37
	Assembly of V. Stabr	41,38	1,34	57102,50	488,22	27,59	0,51
	Assembly of Left Wing	40,78	1,21	10340,39	107,90	13,68	0,37
	Assembly of LWInner	22,57	0,66	26259,21	190,06	24,20	0,34
	Assembly of LWOuter	44,54	0,60	58536,67	196,27	16,95	0,23
	Assembly of Right Wing	40,78	1,21	27052,17	283,35	13,71	0,37
	Assembly of RWInner	22,57	0,66	72674,51	527,72	24,26	0,34
	Assembly of RWOuter	44,54	0,60	58536,67	196,27	16,95	0,23
	Assembly of Fuselage	43,93	1,65	11076,41	130,08	20,68	0,58
	Assembly of Rear Sect.	22,99	0,89	52274,25	547,76	14,84%	0,37%
	Assembly of Nose Fus.	37,25	1,47	59990,43	836,57	13,34	0,50

Tabla 53: resultados de la evaluación intermedia de los nodos de las alternativas A2 y A3 del Cu2.

9.2.3.9 Definición del Lay out

El siguiente bloque tras la definición de las líneas de montaje consiste en distribuir los elementos de cada una en un espacio virtual representativo de la planta a la que están asignados. Sería equivalente al diseño, a un nivel de detalle muy básico, de la maqueta digital de las instalaciones, lo que se conoce como iDMU (industrial Digital Mock Up). Esta acción es necesaria dentro de la metodología, además de por representar un primer paso hacia el diseño en detalle del modelo digital de las líneas de montaje, para determinar las dimensiones que ocupa cada una dentro de cada solución y comprobar su compatibilidad con la planta en la que está localizada, así como la adecuación de los recursos asignados.

Por ejemplo, el utillaje para el producto de una estación podría presentar interferencias con otros elementos de la planta, o sencillamente no ser el adecuado para alcanzar zonas a las que se deban acceder para ciertas operaciones.

En este primer prototipo que implementa la metodología propuesta, se han incluido ciertas funcionalidades para el posicionamiento de los distintos elementos. Dichas utilidades se deben complementar con las que proporciona CATIA V5 para su uso interactivo. Se ha creado varios comandos, “Array!” distribuye los elementos de las distintas estaciones en el espacio, siguiendo un patrón de rejilla según el orden que el producto sigue al irse ensamblando. A partir de ahí, cada estación puede ser ajustada ejecutando “Select Elements”, que preselecciona todos sus elementos para su reposicionamiento con herramientas del entorno. Cuando todos los elementos están posicionados, se debe cargar un modelo digital que representa el suelo de la planta, y debe modificarse para que los englobe a todos y se pueda estimar así la superficie requerida.

Al pulsar el botón “Apply” de la interfaz del paso anterior para la gestión de recursos y operaciones, se cargan las representaciones digitales de los recursos asignados. Por cada recurso concreto se genera un nuevo producto independiente con unos componentes almacenados en el archivo CAD, que representaría su modelo genérico. Este proceso de cargado posiciona por defecto todos los elementos centrados en el producto a ensamblar en el nodo, cuyos componentes a su vez se encuentran solapados de por sí.

La Figura 147 muestra los productos y recursos de la línea final de la alternativa A4, tal y como se han cargado. Los recursos resaltados del árbol representan trabajadores asignados a las estaciones. Se puede observar que todos están en la misma posición, dentro del avión, en la zona señalada por el círculo naranja. Los distintos productos intermedios también se han posicionado de manera solapada, por ejemplo los componentes asociados al estabilizador horizontal se encuentran 3 veces en la planta (correspondientes a los productos en distintos grados de montaje que se encuentran presentes en cualquier momento) y están posicionados en el mismo lugar, en la esquina superior derecha de la figura.

Primero, la metodología propone posicionar todas las estaciones entre sí empleando el comando correspondiente. La Figura 148 muestra los elementos de la línea de montaje final o FAL de la alternativa A4, tras haber sido posicionados con dicho comando. Tras ello, lo más probable es que se requiera un ajuste de la posición de las estaciones, para lo que es útil la funcionalidad desarrollada para preseleccionar los elementos asignados a una estación, o a alguna de sus operaciones. La Figura 149 muestra este proceso: en la interfaz se ha seleccionado una estación de la lista, y al pulsar “Select Elements”, se han preseleccionado los elementos correspondientes, como se puede observar en el árbol y en la ventana de representación tridimensional.

Figura 147: carga de los recursos en la FAL de la alternativa A4 del CU2.

Figura 148: posicionamiento automático de los elementos de la planta de la FAL de la alternativa A4 del CU2.

Figura 149: selección de los elementos de la penúltima estación de la FAL de la alternativa A4 del CU2 para su posicionamiento.

Cuando los elementos relacionados con una estación están preseleccionados, se pueden desplazar todos de manera simultánea hasta la posición deseada. Mediante dicho procedimiento se ha distribuido los elementos de las plantas de las distintas alternativas estudiadas. La Figura 150 muestra la distribución final de la FAL de la alternativa A4 del caso. Las flechas añadidas señalan el flujo que seguirían los productos intermedios a lo largo de la línea. Se ha optado por una distribución que sigue una espiral aproximada alrededor de un grupo central de estaciones, para minimizar el espacio requerido, manteniendo un camino para el flujo de productos intermedios entre estaciones.

Se requiere, tras el posicionamiento, que se cargue la representación del suelo de la planta, y se ajuste su diseño para que englobe a todos los elementos. La Figura 150 muestra dicha representación ajustada a la distribución realizada. El contorno del suelo se ha modificado y ajustado todo lo posible, dejando un margen mínimo que permita una maniobrabilidad adecuada en el transporte de productos.

Figura 150: posicionamiento de elementos de las estaciones del nodo industrial final de la alternativa A4 del CU2.

Figura 151: superficie estimada requerida para la línea de montaje del nodo final de la alternativa A4 del CU2.

Al calcular la superficie requerida, se ha observado que mide 18656 m^2 . Dado que de entre todas las plantas disponibles, la máxima superficie utilizable es de 15000 m^2 , se debe considerar que la línea de montaje final de la alternativa A4, así diseñada, no es factible. Por tanto, si se considera que no se puede lograr una distribución en planta de tamaño significativamente menor, la alternativa entera se debe descartar. La Figura 151 muestra el parámetro donde se almacena la superficie que se requiere para las plantas de los distintos nodos industriales, en el documento general de la alternativa A4.

En el caso CU2, se ha realizado la distribución en planta de las líneas de las alternativas comenzando intencionadamente por la FAL de la A4. Se conocía a priori que la línea final sería la que requeriría mayor espacio. Además, otra alternativa conflictiva, la A1, requeriría una superficie igual o mayor para la suya.

Figura 152: FAL de la alternativa A1 del CU2, tras el posicionamiento automático.

En consecuencia, al descartar la alternativa A4, se puede descartar de forma justificada también la alternativa A1. La Figura 152 muestra los elementos de la línea final de dicha alternativa, tras ejecutar el comando para su posicionamiento en rejilla. Se puede observar que cuenta con estaciones de tamaño similar a todas las de la línea estudiada anteriormente, más 7 estaciones adicionales, por lo que el espacio requerido será mayor y, por tanto, la alternativa también se debe descartar.

Tras descartar las alternativas A1 y A4 se continuó definiendo la distribución en planta de la alternativa A2, empezando por la FAL. De nuevo se ha empleado la funcionalidad para distribuir en el espacio las estaciones y a partir de ahí se ha ajustado la posición de cada una y redefinido la de sus elementos asociados. La Figura 153 muestra cómo se han distribuido finalmente los productos y recursos. En este caso se trata de 4 estaciones, recuadradas en el árbol de procesos en la figura, y el producto sigue el camino entre ellas que aparece indicado. En este caso, además de únicamente posicionar los elementos de cada estación de manera simultánea, se han reposicionado los recursos de manera individual hasta puntos que ocuparán durante cada ciclo, intentando elegir las posiciones extremas que vayan a requerir más espacio de la planta.

Una vez completado este reposicionamiento, se ha cargado la representación del suelo, pulsando "Floor!". El contorno de este elemento se ha modificado para que abarque todos los modelos posicionados. Esta acción se muestra en la Figura 154. Al ser el modelo digital una forma prismática sencilla, basta con modificar el perfil que se empleó como base, que es un octógono irregular con 4 lados paralelos a los ejes x e y. Al estimar la superficie requerida, se ha obtenido el valor de 13852 m^2 , que es menor que el máximo en las plantas disponibles, de 15000 m^2 .

Por tanto, la línea final de la alternativa A2 es factible en cuanto a sus necesidades de espacio, por lo que probablemente el resto de líneas de los demás nodos industriales también lo sean, al requerir menos espacio por tener menos estaciones y tener asociados productos de dimensiones menores. De esa forma también se puede considerar factible la alternativa A3, dado que su línea final es idéntica a la de la A2 en cuanto a número de estaciones y uniones y componentes que estas tienen asociados.

Figura 153: posicionamiento de productos y recursos de las estaciones del nodo industrial final de la alternativa A2 del CU2.

Figura 154: ajuste de la superficie requerida de la planta.

Se ha diseñado la distribución en planta del resto de líneas de montaje asociadas a los nodos industriales de las alternativas A2 y A3. Se ha seguido el mismo proceso que el descrito anteriormente. Como ejemplo, se incluyen diversas capturas. La Figura 156 muestra el ajuste del suelo para la planta de ensamblado del fuselaje central, mientras que la Figura 157 muestra el modelo obtenido finalmente para la línea de dicho nodo. Las imágenes son de la alternativa A2, pero la alternativa A3 presenta un nodo industrial análogo, con los mismos componentes y uniones involucrados, y su línea de montaje asociada se ha definido de la misma manera. Por tanto únicamente podría cambiar la localización de esa planta de una alternativa a otra.

Figura 155: representación tridimensional (iDMU) del nodo industrial final de la alternativa A2

Figura 156: ajuste de la superficie para la línea de montaje del fuselaje.

Figura 157: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje del fuselaje.

En los casos en que existen varias alternativas que presentan nodos industriales con los mismos componentes, se puede emplear un mismo modelo digital de la planta de los nodos análogos. Sin embargo, se debe recordar que las dos líneas no tienen por qué ser exactamente iguales en cuanto a los valores de sus atributos. El coste, por ejemplo, variará según el nivel de salarios del país en que se ubique la línea, por lo que puede variar entre las dos alternativas. Por ello, cada una de las dos líneas análogas deberá tener asociado un documento de tipo CATProcess con su representación digital separado, aunque sean idénticos.

Los nodos industriales relativos al ensamblaje de la sección de cola, el fuselaje delantero y el estabilizador vertical también presentan similitudes en las dos alternativas. Las figuras Figura 158 a Figura 160 muestran los modelos digitales de las líneas de montaje de dichos nodos. En las tres capturas se puede observar, además, que productos y recursos se han ubicado en las posiciones extremas que ocuparán a lo largo de los ciclos de fabricación. De esa forma se evita que la estimación de la superficie requerida sea insuficiente. Ello queda de manifiesto si se examina la Figura 156. Al ajustar la superficie de la línea de montaje del fuselaje se ha tenido en cuenta el espacio que se requeriría para maniobrarlo en su transporte de una estación a la otra.

Figura 158: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje de la sección de cola.

Figura 159: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje del fuselaje delantero.

Figura 160: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje del estabilizador vertical.

Otros nodos, en cambio, sí difieren entre las dos alternativas, aunque estén asociados a los mismos componentes. El ensamblaje del estabilizador horizontal, por ejemplo, constituye un único nodo industrial en la alternativa A2, mientras que en la A3 está repartido en 3 nodos distintos: para el montaje de la parte izquierda, de la parte derecha y otro para ensamblar esas dos secciones con la parte central.

La Figura 161 muestra el modelo digital de la planta de montaje del estabilizador horizontal en la alternativa A2, y las figuras Figura 162 y Figura 163 muestran las líneas para ensamblar el conjunto completo del estabilizador y la sección derecha, respectivamente. El número total de estaciones para el montaje del estabilizador horizontal sería el mismo para las dos alternativas (una sola planta con tres estaciones en el caso de A2 y tres plantas con una estación cada una, en el de A3). La principal diferencia, en términos de costes, vendría dada por el transporte adicional que requeriría la alternativa A3, contra las necesidades de espacio en una única planta de la A2.

Ocurre lo mismo con los submontajes de las estructuras de las alas. En la alternativa A2, por la configuración de su vista As Planned, cada ala se ensambla en un único nodo industrial, mientras que en la alternativa A3 se reparte en tres nodos distintos, para la parte interior, la exterior y para unir ambas. La Figura 164 muestra la maqueta digital en fase conceptual de la línea de ensamblaje del ala derecha, en la alternativa A2. La Figura 165 muestra las tres líneas de montaje distintas que se han definido para cada ala en la alternativa A3.

Figura 161: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje estabilizador horizontal, en la alternativa A2.

Figura 162: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje del estabilizador horizontal, en la alternativa A3.

Figura 163: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje estabilizador horizontal derecho, en la alternativa A3.

Figura 164: representación tridimensional (iDMU) de la línea de montaje del ala, en la alternativa A2.

Figura 165: representación tridimensional (iDMU) de las líneas de los submontajes que componen el ala, de la alternativa A3.

	Industrial Node	Required Surface (m ²)
A2	FAL	13852,16
	Assembly of Nose Fuselage	359,42
	Assembly of Fuselage	3543,00
	Assembly of Rear Section	1107,70
	Assembly of H. Stabilizer	1630,33
	Assembly of V. Stabilizer	393,99
	Assembly of Right Wing	1366,07
	Assembly of Left Wing	1366,07
A3	FAL	13852,16
	Assembly of H. Stab	616,39
	Assembly of HStab_Right	388,47
	Assembly of HStab_Left	388,47
	Assembly of V. Stabr	393,99
	Assembly of Left Wing	429,91
	Assembly of LWInner	553,92
	Assembly of LWOuter	665,84
	Assembly of Right Wing	429,91
	Assembly of RWInner	553,92
	Assembly of RWOuter	665,84
	Assembly of Fuselage	3543,00
	Assembly of Rear Sect.	1107,70
	Assembly of Nose Fus.	359,42
A4	FAL	18656,25

Tabla 54: superficie requerida por las líneas diseñadas a nivel conceptual.

Para las alternativas no descartadas, A2 y A3, se ha definido, por tanto, la distribución en planta de todas sus líneas de montaje. Ello ha permitido una estimación de las necesidades de espacio de los distintos nodos industriales de ambas alternativas. La Tabla 54 muestra la superficie necesaria para cada nodo. Estos requisitos deberán ser compatibles con la superficie disponible en cada planta

9.2.3.10 Nueva optimización de la logística

Cuando se ha definido la distribución en planta de todas las líneas de montaje de una alternativa, ya se dispone de información en cuanto a necesidades de espacio de la planta. Por este motivo se debe ejecutar de nuevo la optimización de la distribución logística, para comprobar que las plantas asignadas anteriormente tienen suficiente espacio disponible. Además, otros parámetros han cambiado, por ejemplo, el tiempo de ciclo de la alternativa será distinto, por lo que la solución óptima puede haber variado respecto a la obtenida la primera vez.

La Tabla 66 muestra las nuevas soluciones para la red logística obtenidas para las alternativas A2 y A3. Se han resaltado las casillas que han cambiado desde la solución anterior. Por ejemplo, el nodo de la FAL de ambas alternativas no se puede ubicar en la planta de Puerto Real, puesto que requiere una superficie mayor que la disponible en dicha planta. Una consecuencia de ello, por ejemplo, es que el fuselaje se debe transportar desde su planta en Puerto real. La posibilidad de ubicar la línea de dicho sub montaje en la misma planta que la FAL no es factible, dado que la suma de las dos superficies requeridas supera la de cualquiera de las plantas existentes. El coste total de transporte, como se puede comprobar, ha aumentado para ambas alternativas.

	NODE OF THE NETWORK	LOCATION	MEAN	COST (€)	N el.s	Ut (h)
A2	Plant for Aircraft1	Illescas, Sp		-		
	Plant for H. Stab	Bristol, UK	APC	127839.17	8	0,03
	Plant for V. Stabr	Laupheim, Ge	Truck,	6741.47	3	0,10
	Plant for Left Wing	Nantes, Fr	Truck,	5812.90	2	0,05
	Plant for R. Wing	Nantes, Fr	Truck,	5816.13	2	0,05
	Plant for Nose Fus.	Nantes, Fr	Truck,	4319.12	3	0,05
	Plant for Rear Sect.	Laupheim, Ge	Truck,	13628.26	1	0,10
	Plant for Fuselage	Puerto Real, Sp	APC	139517.79	1	0,01
	TOTAL COST (€)			475813.39		
A3	Plant for Aircraft1	Illescas, Sp		-		
	Plant for H. Stab	Nantes, Fr	Truck,	3443.52	5	0.06
	Plant for V. Stabr	Nantes, Fr	Truck,	3946.67	3	0.05
	Plant for Left Wing	Nantes, Fr	Truck,	5812.90	2	0.05
	Plant for R. Wing	Laupheim, Ge	Truck,	10207.07	2	0.10
	Plant for Fuselage	Puerto Real, Sp	APC,	139517.79	1	0.01
	Plant for Rear Sect.	Laupheim, Ge	Truck,	13628.26	3	0.10
	Plant for Nose Fus.	Laupheim, Ge	Truck,	7377.67	3	0.10
	Plant for LWInner	Bristol, UK	CS6500TEU	18848.54	29	0.15
	Plant for LWOuter	Hamburg, Ge	Truck,	3340.28	6	0.07
	Plant for RWInner	Hamburg, Ge	Truck,	3043.60	4	0.04
	Plant for RWOuter	Nordenham, Ge	Truck,	2399.02	6	0.05
	Plant for HStab_Right	Brighton, UK	CS6500TEU	13710.15	29	0.14
	Plant for HStab_Left	Nordenham, Ge	Truck,	1420.71	14	0.07
	TOTAL COST (€)			496698.02		

Tabla 55: resultados de ejecutar la optimización logística tras la distribución en planta, para las alternativas A2 y A3 del CU2.

9.2.4 Resultados obtenidos

El último paso planteado en la metodología es la evaluación de las soluciones o alternativas desarrolladas. Para permitir una correcta estimación de todos los parámetros que intervienen en la evaluación se requiere que se haya definido las líneas asociadas a cada nodo y su distribución en planta, y que exista una red logística asociada compatible con todo ello.

Figura 166: pertenencia a los conjuntos borrosos de salida de la puntuación de las alternativas A2 y A3, respectivamente.

En el caso de estudio CU2 se han seguido todos los pasos incluidos en la metodología para la definición completa de dos posibles soluciones para el proceso de montaje. En el proceso se han ido descartando el resto de posibilidades, de un total de 5. La posibilidad A5 se desestimó al definir la red logística, pues incluía un sub montaje difícil de ser transportado. Las alternativas A1 y A4 se descartaron al comprobar que requerirían para sus líneas de montaje finales una superficie mayor de la que está disponible en ninguna de las plantas existentes.

Se ha continuado con el desarrollo de las alternativas A2 y A3, para las que se han completado todas las etapas de la metodología. Finalmente se ha ejecutado la función para evaluarlas mediante el sistema basado en lógica borrosa desarrollado. La Figura 166 muestra las funciones de pertenencia a los conjuntos borrosos de salida para ambas alternativas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 56, incluyendo la puntuación final sobre 10 obtenida.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se puede concluir que, según las reglas incluidas en la metodología y respetando sus hipótesis, de las alternativas que se definieron al principio del caso, la más adecuada es la denominada A2. Ésta implica un menor gasto con el mismo tiempo de ciclo de la A3.

Desde las primeras etapas se podía haber inferido que el coste de transporte sería mayor para la alternativa A3, puesto que presentaba un mayor número de nodos industriales. Sin embargo ello no se podía afirmar con seguridad, dado que los productos a transportar entre algunos serían de dimensiones menores, por lo que el coste no sería tan alto; además el espacio requerido para varios de los nodos (como el ensamblaje de las alas o del estabilizador horizontal) sería más reducido, por lo que se podrían ubicar en las mismas localizaciones que otros, ahorrando algunos trayectos. Por otro lado, las líneas con menos operaciones de unión a realizar podrían repercutir en un menor tiempo de ciclo o, puesto que dicho valor viene fijado por el tiempo de ciclo de la FAL, que se requiera un menor número de turnos o de recursos asignados y un coste menor. En resumen, a priori no se podía decir cuál de las dos alternativas era mejor pero, una vez aplicado el sistema de evaluación, queda claro que es mejor la A2, siempre según los criterios implementados en el propio sistema en forma de reglas.

	Cycle time (real h)	U_{time} (h)	Total Cost (€)	U_{Cost}	Effi- ciency (%)	UEff (%)	Transport Cost (€)	Lead Time (h)	Final Score (over 10)
A1	Dismissed								
A2	125,95	13,56	986277,74	28330,03	20,02	0,19	475813,39	1133,51	6,070369167
A3	125,95	16,57	1314678,65	699,09	15,26	0,11	496698,02	1385,40	4,504779023
A4	Dismissed								
A5	Dismissed								

Tabla 56: resultados de la evaluación de las alternativas del CU2.

9.2.5 Supuesto 2: Evaluación de cambios en una alternativa

La segunda parte de este segundo caso de estudio ha consistido en la introducción de ciertos cambios en una solución ya definida para evaluar las consecuencias de los mismos. Se ha empleado la solución que obtuvo los mejores resultados de la primera parte del CU2, es decir, la alternativa A2.

9.2.5.1 Variación del número de ciclos transcurridos (influencia del aprendizaje)

En primer lugar se ha evaluado el montaje variando el parámetro del número de ciclos de producción transcurridos. Hasta el momento todas las evaluaciones y los cálculos de propiedades se han efectuado para el primer ciclo de la producción. Sin embargo, en el sistema se ha incluido un modelo de aprendizaje, según el cual las tareas llevadas a cabo por un humano requieren un menor tiempo para su finalización dependiendo del número de veces que se han repetido previamente.

Casos de estudio

Figura 167: evolución del tiempo de finalización de las líneas de montaje de los nodos de la alternativa A2, junto con la eficiencia total ponderada (verde), con el número de ciclos transcurridos.

Figura 168: evolución del coste por cada ciclo del proceso de la alternativa A2 y de su puntuación según el sistema, con el número de ciclos transcurridos.

Se ha implementado un modelo ampliamente aceptado [91]-[95], que establece que el tiempo de finalización se ve disminuido según un parámetro denominado coeficiente de aprendizaje, al duplicar el número de veces que se ha realizado esa operación. En la sección 5.5.6 se explica el modelo definido de manera detallada.

En el caso particular del CU2, se debe tener en cuenta que el número de veces que una tarea se ha repetido no coincide con el número de ciclos que hayan transcurrido, puesto que la mayoría de operaciones incluye un número de elementos mayor de 1. Así, cualquier operación vinculada con una unión que tenga, por ejemplo, 5 elementos (como 5 remaches o taladros a realizar) se repetirá 5 veces por cada ciclo con lo que cuando hayan transcurrido 10 ciclos, la operación se habrá realizado un total de 50 veces. Ello añade complejidad al sistema, puesto que el número de elementos es distinto para cada unión, por lo que los distintos tiempos de finalización evolucionarán de manera distinta con el número de ciclos transcurridos.

Para comprobar la evolución de las propiedades del proceso según el número de ciclos se ha ejecutado la evaluación del mismo variando el valor del número de ciclo actual. Se han empleado los valores 5, 10, 50, 100 y 1000, además de 1, que era el valor cuando se ejecutó la evaluación en la primera parte del CU2.

La Figura 167 muestra los tiempos de finalización de las líneas de los nodos industriales de la solución. Como se puede observar, en el ciclo número 5, el tiempo de finalización de la línea final no ha variado. Ello se debe a que cuando aún no han pasado 5 ciclos, las estaciones de esa línea aún no se han activado, puesto que ningún producto ha alcanzado dicho punto aún, el quinto ciclo sería el primero en que sí. En el mismo gráfico se ha incluido la eficiencia del uso de recursos ponderada; se trata de la curva de color verde.

La Figura 168 muestra la evolución del coste total (por ciclo) y de la puntuación de la solución según el sistema basado en Lógica Borrosa. Se observa que el coste no varía de 1 a 5 ciclos. Se debe a que el tiempo de ciclo del proceso no varía, pues sigue siendo el tiempo de finalización de la línea final (el mayor). La eficiencia, en cambio, sí varía en ese período, empeorando. Por ello la puntuación es menor para 5 ciclos transcurridos.

A partir del ciclo número 10, los valores de coste y los tiempos mejoran en gran medida, como se muestra en las figuras. Sin embargo, la eficiencia en el uso de recursos empeora, dado que las diferencias en el tiempo de finalización de las líneas aumenta, por lo que habrá un mayor número de recursos inactivos. La puntuación global mejora lentamente tras el ciclo 5, pero entre el 100 y el 1000 comienza a empeorar lentamente.

Se puede concluir que, según el modelo de aprendizaje implementado, los tiempos y costes del proceso se ven reducidos drásticamente. La causa es que el número de repeticiones es mayor que el previsto, debido al número de elementos de cada unión. Además, se constata que a partir de cierto límite de ciclos, la puntuación de las soluciones empieza a decaer.

9.2.5.2 Modificación del número de turnos de una estación

Se ha considerado interesante comprobar los efectos de un cambio en el valor del número de turnos de una estación en una solución ya definida. Para ello se ha empleado la solución de la alternativa A2, particularizada para un valor de 1000 ciclos transcurridos.

El objetivo ha sido la mejora de la solución para dicho número de ciclos. En esas condiciones, como muestra la Figura 168, el tiempo de ciclo viene dado por el tiempo de finalización del nodo para el montaje del fuselaje central. Se ha comprobado que una de las dos estaciones de la línea de dicho nodo tiene únicamente asignado un turno y es la que define el tiempo de ciclo de todo el proceso. Para mejorar estas condiciones, se ha modificado el número de turnos de la estación mencionada, y se ha vuelto a evaluar el sistema.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 57. Se verifica que con el cambio descrito, la solución mejora en coste, tiempo y eficiencia. Un aumento del número de turnos en principio de vería provocar un aumento del coste, al ser necesario un mayor uso de recursos. Sin embargo, si el aumento del número de turnos implica mejorar sustancialmente el tiempo de ciclo, el coste se acaba reduciendo.

Como consecuencia de esta segunda parte del CU2 se plantea que para el caso concreto del CU2 puede ser interesante que, tras un número de ciclos superior a 100, se incremente el número de turnos del nodo para el montaje del fuselaje central.

	St	N. Shifts	Tst (h)	Tcyc (h)	Cost(€)	Eff. (%)	Final score (over 10)
A. of Fus.	WS1	2	11.40	22.92	730496	18.11	7,21018
	WS2	1	22.92				
	WS1	2	11.40	20.50	706882	20.02	7,51972
	WS2	2	11.46				

Tabla 57: resultados de variar el número de turnos de una estación de la alternativa A2.

Capítulo 10

Evaluación de objetivos

Anteriormente en este documento de tesis doctoral se ha expuesto las ideas principales en las que se basa la metodología, así como el alcance de los trabajos realizados y sus objetivos, los modelos y métodos que constituyen los desarrollos efectuados, la implementación de los mismos y su aplicación en unos casos prácticos que validen las características proyectadas. En este capítulo y los siguientes se valorará los resultados obtenidos. Se trata, por tanto de la parte del documento relativa a la evaluación de todo el trabajo realizado, que culminará con las conclusiones finales de la tesis.

Concretamente, en este capítulo se evaluará el grado de cumplimiento de los objetivos que se enumeraron y explicaron en el Capítulo 4. Se estudiará cada objetivo específico de manera individual para valorar la consecución del general.

El objetivo principal de la tesis es la elaboración de una metodología para diseñar el proceso de montaje de un producto a nivel conceptual. Para ello se sigue un enfoque consistente en generar un número de alternativas de dicho proceso, todas ellas factibles según criterios que deben estar incluidos en la propia metodología.

El objetivo principal descrito se desarrolló en 4 objetivos específicos, concretos, que se debían cubrir. A continuación se enunciarán dichos objetivos y se especificará en qué medida se considera que se han cumplido

- *Asistir en la generación de soluciones conceptuales de calidad y factibles para el proceso de montaje*

La metodología que se ha creado se compone de 6 bloques que permiten definir los distintos aspectos que se ha considerado que determinan una solución del proceso de montaje a nivel conceptual. Para cada paso que implicase una decisión que afectase a la alternativa se muestra información sobre las consecuencias de la misma y otros aspectos del proceso de montaje. Por ejemplo, en la etapa 3 del Bloque B se puede visualizar los valores de tiempos y costes según el estado de definición actual de la línea de montaje, antes de aplicar los cambios establecidos. En las etapas 1 y 2, en las que la línea se encuentra en un estado de desarrollo más básico, se muestra el conjunto de sub montajes resultantes de la secuencia de montaje definida y el tiempo de ciclo en el nodo y en el proceso general según la configuración de estaciones elaborada, respectivamente.

Otra idea que incluye este objetivo está relacionada con la generación de variantes de una solución. La metodología desarrollada finalmente no incluye una asistencia específica para que el usuario genere variaciones de manera sencilla, por ejemplo gestionando los nombres y rutas de acceso de los documentos que definirían cada solución o variante, y facilitando el acceso a los mismos partiendo de un único documento de representación general; o bien recordando en los puntos significativos del procedimiento la utilidad de definir dichas variantes.

La manera en que se ha implementado la metodología permite la creación de nuevas soluciones a partir de variaciones en cualquier momento entre la ejecución de dos bloques. Sencillamente, es posible guardar una versión del documento de representación general que contenga cambios respecto al original.

También es posible crear una versión distinta de un documento de representación de la línea de montaje de un nodo industrial. En tal caso, el nodo correspondiente en el documento general podrá estar relacionado con una versión u otra dependiendo de la ruta almacenada en su propiedad HL_iDMU. Sin embargo, aunque sea posible, no se ha incluido de manera explícita en la metodología, por lo que se debe considerar que ese aspecto de este primer objetivo no se ha cumplido.

Por otra parte, la metodología creada sí cubre la definición de los elementos correspondientes a todas las facetas que componen una solución al problema del diseño del proceso de montaje a nivel conceptual, teniendo en cuenta cómo se ha modelizado éste. El problema, tal y como se plantea en la sección 5.1.1, se puede descomponer en generar la estructura As Planned, definir un plan logístico y definir un plan de procesos de la línea de montaje de cada nodo industrial, así como su distribución en planta preliminar. Todas esas tareas están soportadas por la metodología que se ha desarrollado y se incluyen el prototipo de la misma creado.

La metodología elaborada implica la automatización de un gran número de acciones de carácter rutinario y que no están relacionadas con ninguna decisión que afecte a la solución ni le aportan ningún valor. De esa forma se evita destinar esfuerzo de los ingenieros y diseñadores a ese tipo de tareas. Se considera, por tanto, que ese aspecto del objetivo se ha cumplido, aunque existen aún algunas tareas cuya realización se podría automatizar. Por ejemplo, al final de la etapa 3 del Bloque B se puede requerir, para los recursos compartidos entre actividades, o bien asignar nuevas unidades a la línea o separar las actividades en el diagrama de Gantt. Podría ser interesante que el usuario tomara dicha decisión, pero que las acciones requeridas para realizar cada opción se automatizasen.

■ *Comparar las alternativas definidas*

Como último bloque de la metodología se ha incluido un sistema de evaluación que evalúa una solución del proceso de montaje dada, y a partir de sus valores para unos parámetros globales del proceso relacionados con los costes, los tiempos y la eficiencia en el uso de los recursos, obtiene una puntuación entre 1 y 10. Dicho sistema se basa en la Lógica Borrosa (FL), e implica un conjunto de reglas fácilmente interpretables y ajustables. Las puntuaciones que se pueden obtener, dadas las características del sistema, serán números reales que difícilmente se repetirán. Así alternativas con características similares con toda probabilidad obtendrán puntuaciones distintas, lo que facilitará la elección de una de ellas.

■ *Evaluar un proceso de montaje definido a nivel conceptual*

El bloque dedicado a la evaluación que se ha desarrollado e implementado, además de la obtención de la puntuación de una solución empleando la FL, también implica el cálculo de muchos parámetros del proceso de montaje, empezando por los mismos valores de entrada para la aplicación de la FL. Se calculan los costes totales, así como los imputables al transporte, en total y para cada nodo industrial; el tiempo de ciclo en horas de trabajo y horas reales, así como el tiempo de entrega de una unidad y la eficiencia en el uso de los recursos, tanto a nivel nodo como el valor global ponderado. Para cada valor se calcula la incertidumbre asociada.

Por tanto, es factible introducir cambios en las condiciones de una solución y comprobar las implicaciones sobre los parámetros del proceso. Los cambios podrán ser relativos al número de unidades ensambladas o tiempo que lleva en marcha la producción, al tiempo de ciclo o al coste admisible de referencia o al número de turnos extraordinarios de una o varias estaciones. Cada uno de estos cambios puede ser valorado de forma independiente, y así estudiar las correlaciones dentro del proceso, que diferirán en cada caso particular.

▪ *Facilitar el desarrollo de una solución a niveles de detalle mayores*

Las soluciones que se pueden obtener mediante la aplicación de la metodología se pueden representar mediante documentos de tipo Proceso de la herramienta CAD/CAM CATIA V5. Concretamente, se ha desarrollado el prototipo para su implementación de forma que una solución esté representada mediante un documento de este tipo de carácter general del proceso, al que estarán asociados documentos que representarán cada línea de montaje implicada.

El proceso de montaje, en niveles de desarrollo más avanzados, se puede definir mediante el empleo de los módulos adecuados de CATIA/DELMIA. Por tanto, se considera que las soluciones conceptuales generadas con la metodología pueden continuar desarrollándose en etapas posteriores del ciclo de vida, mediante la adición de más componentes o el reemplazo de modelos digitales sencillos por otros más complejos, representando los mismos objetos. Se considera que las soluciones conceptuales que se pueden obtener son un punto de partida para tareas avanzadas como la elaboración del plan de procesos definitivo o el diseño de la Maqueta Digital Industrial o iDMU.

El cumplimiento o no de los objetivos específicos se demuestra gracias a la implementación realizada, que consistió en la programación de una aplicación que se ejecuta dentro del entorno CATIA V5 y permite ejecutar los pasos definidos en la metodología. Este prototipo se utilizó para la realización de unos casos de estudio, en los que se manifestaban las características implementadas, que se corresponden con los objetivos específicos cumplidos.

Como conclusión del capítulo, se considera que el objetivo principal se ha cumplido, dado que el grado de cumplimiento de los objetivos específicos en los que se ha desglosado es alto. Gracias a la ejecución del prototipo programado siguiendo los casos de estudio definidos, se demuestra el cumplimiento de dichos objetivos. Una característica que, sin embargo, no se ha incluido en la metodología es la asistencia en la definición de variantes de una solución y la gestión de las mismas. Esa funcionalidad se considera pendiente para futuras versiones de la aplicación que implementa la metodología.

Capítulo 11

Desarrollos futuros

Continuando con la parte del documento dedicada a la valoración de los resultados obtenidos y conclusiones, en este capítulo se exponen las líneas de desarrollo que sería interesante seguir a partir de lo conseguido. Se incluye tanto mejoras que se podrían realizar a la metodología como nuevas características que aportasen valor.

El capítulo se ha dividido en 3 apartados, para clasificar los desarrollos que se plantean según el área de la metodología con la que están relacionados. Se considera que puede tratarse de desarrollos relativos a nuevas funcionalidades, a la parte correspondiente a la modelización del proceso de montaje o a la manera en que la metodología se puede implementar.

11.1 Relativos a funcionalidades

En primer lugar se enumerarán y describirán brevemente las posibles nuevas funcionalidades que se podrían desarrollar para dar asistencia a más tareas del diseño conceptual del proceso de montaje u otras dentro del ciclo de vida del producto, así como mejoras para las funcionalidades existentes.

Una característica de diseño de la metodología que no se ha implementado de forma directa es la asistencia para la definición de variantes de una solución del proceso de montaje. Dicha característica se podría emplear en unos puntos concretos del procedimiento e implicaría la gestión de las alternativas generadas. Se debería tener en cuenta para nuevas versiones de la aplicación que implementa la metodología.

En la etapa de definición de la secuencia de montaje no se incorpora ninguna restricción más allá de que sólo se incluyan las uniones implicadas en el producto asociado a esa línea de montaje. La propuesta consistente en definir el montaje a través del desmontaje e identificar secuencias no factibles mediante las colisiones[27][30][61] es muy interesante. En la metodología propuesta no se incorpora ningún sistema que detecte incompatibilidades físicas en las secuencias de ejecución de las uniones. Se podría incluir, asimismo, la posibilidad de definir restricciones de carácter tecnológico, en forma de relaciones de precedencia entre uniones. Todo ello se plantea como desarrollo futuro.

Se podría añadir funcionalidades destinadas a asistir en la mejora de una solución. Dado que la eficiencia en el uso de los recursos es una magnitud que mide el porcentaje del coste de los recursos que está directamente relacionado con el uso de los mismos, se considera que está relacionado con el margen de mejora de una solución. Una baja eficiencia en teoría implica que es posible tener un coste menor manteniendo su tiempo de ciclo si se desasignan algunos recursos, o mejorar los tiempos si los recursos asignados se utilizan más tiempo en cada ciclo. Se podría definir un sistema para la mejora de soluciones basándose en su eficiencia, teniendo en cuenta un margen de mejora y dirigiendo los esfuerzos a los nodos más optimizables de cada solución.

Otra posible nueva funcionalidad a incluir podría dar soporte a la actualización de una solución debida a un aumento del nivel de desarrollo del diseño del producto y de su industrialización. Con ello, se podría actualizar el modelo de producto y adaptar la solución a ello. El resultado sería un mayor número de componentes y uniones a tener en cuenta

Una mejora menor de la implementación de la metodología consistiría en introducir la posibilidad, en el Bloque D, de que el usuario fije más restricciones previamente a lanzar el método ACO. Actualmente, se permite que para unos nodos seleccionados se asigne una localización fija, o bien se evite asignar un conjunto de localizaciones. Se podría incluir limitaciones relativas a los medios de transporte o al número máximo de productos a transportar en un trayecto.

El método de optimización meta heurístico ACO debe realizar en distintos momentos de la ejecución una evaluación de plantas industriales y medios de transporte. Se podría introducir el concepto de Lógica Borrosa en tales evaluaciones, con lo que se tendría un mayor control sobre la forma de ponderar cada parámetro que se tiene en cuenta.

Además, los procedimientos de asignación automática de los recursos más rápidos o más baratos, en la Etapa 3 del Bloque B, se podrían modificar para que se tratase de auténticos procesos de optimización. Para ello, dado el elevado número de posibilidades, se considera adecuado la definición de un nuevo método meta heurístico, que podría ser también del tipo ACO. De esa forma se obtendría una configuración de los recursos asignados cercana al óptimo en cuanto a costes, tiempos o un balance entre ambos. También se podría considerar emplear ese tipo de métodos en otras acciones dentro de la metodología, como determinar la estructura As Planned, la secuencia de montaje o el número de estaciones de una línea, aunque fuese únicamente para obtener unas guías y luego el usuario tomase las decisiones definitivas. De esa forma, se podría hablar de una auténtica optimización del diseño del proceso de montaje.

11.2 Relativos a los modelos

A continuación, se describe posibles nuevos desarrollos relativos a la modelización de los elementos implicados en el proceso e montaje, para una mejor evaluación de una solución o para soportarla adición de nuevas características.

Una posible línea de desarrollo futura sería la ampliación del nivel de los diccionarios PRD y el modelo de costes en general. En la metodología, los costes que se estiman únicamente cubren el nivel denominado “unidad” según el enfoque ABC [83]–[85], en el que únicamente se consideran las actividades que se ejecutan con cada unidad producida. La inclusión de actividades que tuvieran impacto sobre la serie, como la construcción de los utillajes, o sobre la producción, como la adquisición de instalaciones, mejoraría la precisión de la estimación de costes. Para ello, se requeriría estudiar cómo relacionar las actividades de los niveles mencionados con el montaje de un producto para un caso genérico.

En el modelo relativo a la planificación logística, sería interesante añadir nuevos criterios para la elección de los puntos de origen de los componentes. Se podría añadir criterios relativos a la calidad, como por ejemplo el índice de aceptación de las piezas según su fábrica de procedencia, que se podría valorar junto con los costes asociados. Para este tipo de desarrollos, sería necesario incluir nuevos atributos en los elementos del PRD correspondientes a los recursos de tipo “Industrial plant”, así como modificar las reglas de cálculo del algoritmo del método ACO.

11.3 Relativos a la implementación

Los desarrollos relacionados con la forma de implementar la metodología se orientan principalmente a una organización más lógica de la información que se gestiona y a mejorar la visibilidad y el acceso a la misma por parte del usuario.

Un aspecto que tiene cierto margen de mejora está relacionado con el diccionario PRD, específico de cada caso de montaje. En el prototipo que implementa la metodología, el PRD debe estar definido en un archivo Excel, y el sistema, a partir de ahí, crea de forma automática los objetos correspondientes a los tipos de recursos y actividades para ese caso. Sin embargo el archivo Excel debe tener un formato muy concreto, lo que hace difícil que un usuario de la aplicación pueda crearlo o modificarlo de manera que el resultado sea válido para la correcta ejecución del sistema. Por tanto, se podría desarrollar una funcionalidad que asistiera en la creación o modificación del diccionario PRD.

En cuanto al soporte para almacenar la información contenida en un PRD, sería más lógico emplear el sistema de bibliotecas de actividades y recursos que provee CATIA V5/DELMIA. De esa forma la información estaría incluida en el sistema y no sería necesario importarla de archivos externos. Un diseñador podría, por ejemplo, definir una operación de un tipo contenido en el PRD de forma interactiva en el entorno CATIA, con todos los atributos e hijoOs que debería tener según el modelo. En la implementación efectuada no se pudo emplear la característica de CATIA relativa a las bibliotecas de procesos y recursos debido a falta de acceso de las licencias disponibles; y no se consideró que los beneficios de dicha característica compensaran los costes de ampliar la licencia. Sin embargo, para desarrollos que exploten todas las funcionalidades de CATIA, se recomienda incluir este aspecto.

Una mejora interesante que se podría incluir en futuras implementaciones de la metodología es la inclusión de las reglas de cálculo del modelo, descritas en la sección 5.5.5, en el entorno CATIA V5/DELMIA, ya que soporta la definición de funciones matemáticas que empleen como entradas el valor de parámetros para el cálculo de otros. De esa forma, los diseñadores podrían gestionar las reglas internas, e incluir modificaciones o mejoras. También sería posible añadir nuevas reglas, por ejemplo para el cálculo de atributos que se añadan a un PRD, con lo que se obtendría un modelo totalmente abierto.

Capítulo 12

Conclusiones

Este capítulo recoge las conclusiones de todos los trabajos realizados. Se trata del último capítulo en el que se argumentan ideas relativas a los desarrollos, y se ha concebido como un cierre de la sección de valoración de los resultados obtenidos y del documento de tesis en general.

Se ha desarrollado una metodología para el diseño conceptual del proceso de montaje de un producto, enfocada principalmente al sector aeronáutico. Mediante la aplicación de la metodología es posible obtener soluciones de diseño factibles según las relaciones implementadas, evaluarlas en términos de costes y tiempos y compararlas entre sí.

Para la elaboración de la metodología, se ha definido un modelo del problema que se buscaba resolver: el diseño del proceso de montaje a nivel conceptual. La modelización de dicho problema implica que una solución factible se compone de 4 soluciones parciales acopladas: la distribución del proceso de montaje en nodos industriales, o definición de la estructura As Planned; la definición de la línea de montaje vinculada a cada nodo, incluyendo la secuencia de montaje, las estaciones de la línea y su estructura de procesos y los recursos asignados a las operaciones; el diseño de la distribución en planta de cada línea y la definición del plan logístico, la localización de cada nodo y la red de transportes para comunicar todas las localizaciones.

Se ha desarrollado unos modelos para dar soporte a toda la metodología. Se ha creado un meta modelo de los elementos generales, adaptando un modelo de información existente; se ha creado el concepto de PRD, para incluir tipos de procesos y recursos específicos de cada caso de montaje y se ha definido un conjunto de reglas de cálculo que relacionan todos los parámetros de los elementos del proceso de montaje presentes en los modelos.

La definición de la red logística se realiza mediante la aplicación de un método de optimización discreta denominado ACO. Para ello se ha programado un algoritmo que aplica dicho método con los elementos que componen la red, de manera que se obtengan las soluciones de mayor calidad para esta parte del problema.

Una solución generada mediante la metodología puede ser evaluada aplicando las reglas de cálculo definidas, y determinar así sus resultados en términos de tiempos, costes y eficiencia en el uso de los recursos asignados. En el cálculo de parámetros se tiene en cuenta la propagación de la incertidumbre y el fenómeno de aprendizaje de los operarios, que repercute en una reducción de la duración de las tareas en función de las veces que se hayan repetido.

Las soluciones obtenidas para un caso de montaje pueden ser comparadas entre sí para encontrar la más adecuada. Para ello, se ha elaborado un método basado en la FL, que determina una puntuación a partir de los parámetros de una solución, aplicando un conjunto de reglas capturadas mediante lenguaje natural.

Los desarrollos se han implementado programando un prototipo de aplicación que sigue las etapas definidas de la metodología. La implementación también incluye una forma de representar las soluciones del diseño del proceso de montaje, en la herramienta CAD/CAM CATIA V5, que se emplea en la industria para el diseño de productos y procesos. La representación de cada solución permite que se pueda continuar desarrollando en etapas más avanzadas del ciclo de vida.

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

Se ha ejecutado dos casos de estudio en los que se ejecuta el prototipo creado. En ambos casos se obtiene una solución conceptual del proceso de montaje, puntuada mejor dentro de un grupo de alternativas. Los casos de estudio manifiestan las características de la metodología y, en consecuencia, validan las ideas que se han desarrollado a lo largo del doctorado y que se exponen en el presente documento de tesis doctoral.

Por tanto, se considera cumplidos los objetivos de la tesis doctoral, expuestos en el Capítulo 4. No obstante, como se puntualiza en el Capítulo 10, no se ha trabajado el aspecto de la asistencia explícita para definir y gestionar alternativas de diseño.

En consecuencia, se considera que la metodología desarrollada y expuesta en este documento es válida para la realización de la etapa del ciclo de vida del producto relativa al diseño del proceso de montaje a nivel conceptual. Esto sienta una base para futuros desarrollos que, siguiendo esta línea, profundicen más en las características seleccionadas; o bien otros que exploren la asistencia a otras tareas del diseño de la industrialización de un producto.

Capítulo 13

Anexos

13.1 Modelos PPR

13.1.1 Diccionario PRD de ejemplo

	VAR	INVOLVED OPERATIONS	IS SEP.	P	OPERATION TYPE	VARIANT
Prepare spaghetti Bolognese	Mixing before serving	Cook the spaghetti	Yes	1	Cook pasta	
		Cook the sauce	Yes	1	Cook Bolognese sauce	
		Mix spaghetti and sauce	Yes	2	Mix ingredients	
Cook pasta		Heat water to boiling point	Yes	1	Boil liquid	Water
		Cook the pasta	Yes	2	Cook ingredient	At boiling water
		Extract the pasta and strain it	Yes	3	Strain	
Cook Bolognese sauce		Heat the olive oil	Yes	1	Boil liquid	Oil
		Cook the onion	Yes	2	Cook ingredient	On a pan at med. Heat
		Add the minced beef and cook it	Yes	3	Cook ingredient	Standard
		Add the chopped tomatoes and cook the sauce	Yes	4	Cook ingredient	On a pan at low Heat

Tabla 58: actividades compuestas del PRD de ejemplo.

	VAR	REQUIRED RESOURCES TYPES	ADDITION	SKILLS	ATTRIBUTES		
					Name	Type	U.
Boil liquid	Water	Pot	Linear in capacity		Time	Real	s
		Fireplace	Linear in capacity		Req. cap.	Real	l
		Worker	No				
	Oil	Pan	Linear in capacity		Time	Real	s
		Fireplace	Linear in capacity		Req. cap.	Real	l
		Worker	No				
Strain		Colander	Linear in capacity		Time	Real	s
		Worker	No	Pasta cooking	Req. cap.	Real	l
Cook ingredient	Standard	Pan	Linear in capacity		Time	Real	s
		Fireplace	Linear in capacity		Req. cap.	Real	l
		Spoon	Linear in capacity				
		Worker	No	Cooking on pan			
	On a pan at med. Heat	Pan			Time	Real	s
		Fireplace	Linear in capacity		Req. cap.	Real	l
		Spoon	Linear in capacity				
		Worker	No	Cooking on pan			
	On a pan at low Heat	Pan			Time	Real	s
		Fireplace	Linear in capacity		Req. cap.	Real	l
		Spoon	Linear in capacity				
		Worker	No	Cooking on pan			

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

	At boiling water	Pot		Time	Real s
		Fireplace	Linear in capacity	Req. cap.	Real l
		Spoon	Linear in capacity		
Mix ingr.s		Worker	No	Cooking on pan	
		Pot	No	Time	Real s
		Spoon	No	Req. cap.	Real l
		Worker	No	Cooking on pan	

Tabla 59: actividades simples del PRD de ejemplo.

ATTRIBUTES			MODEL	TYPE	ATTRIBUTES			SPE- CIALITY	SKILLS
Name	Type	U.			Name	Val.	Type		
Pot	Capacity	Real	VAL2000	Pot	Capacity	10	Real		
	Heat transfer eff.	Real	St		Heat transfer eff.	0,85	Real		
	Model	String	VAL2000	Pan	Capacity	7	Real		
	Capacity	Real	Pan BSze		Heat transfer eff.	0,75	Real		
Pan	Heat transfer eff.	Real	VAL2000	Pan	Capacity	5	Real		
	Model	String	Pan MSze		Heat transfer eff.	0,8	Real		
	Power	Real	Wok	Pan;	Capacity	6	Real		
Fire-place	Model	String	TFKIT	Pot	Heat transfer eff.	0,65	Real		
Worke	Skills()	Enum	Kfire MAX	Fire-place	Power	20	Real		
r	Speciality	String	Std Col	Colan-der	Capacity	8	Real		
Colan-der	Capacity	Real	Std Sp.	Spoon					
Spoon	Model	String							

Tabla 60: recursos generales, modelos y trabajadores del PRD de ejemplo.

13.1.2 Diccionario PRD empleado para casos de estudio

ID	TYPE	VAR	INVOLVED OP.s	IS SEP	P	OP. TYPE	VAR	REQ RES.s	ATTRIBUTES				SUB-JECT
									Name	Type	U.		
MJ1	Mechanical joint execution	Metal-metal	Drill to first diameter the witness holes	No	1	Drilling			Cost	Real	€		
			Match holes mesh	No	2	Generic	Manual		U.in cost	Real	€		
			Drill to final diameter	No	3	Drilling			Time	Real	s		
			Counterbore	No	4	Counter-boring			U. in time	Real	s		
			Separate and clean	No	5	Generic	Manual		Subject	String			
			Apply sealer to surface	Yes	6	Sealing							
			Close and Cure	next MJ1.6	7	Generic	Manual						
Rivet		Yes	8	Riveting									
MJ2		Metal-composite	Drill to first diameter the witness holes	No	1	Drilling			Cost	Real	€		
			Match holes mesh	No	2	Generic	Manual		U. in cost	Real	€		
			Drill to first diameter all the holes	No	3	Drilling			Time	Real	s		
			Separate and clean	No	4	Generic	Manual		U. in time	Real	s		
			Apply sealer to surface	Yes	5	Sealing			Subject	String			
			Close and Cure	Next MJ2.5	6	Generic	Manual						
	Drill to final diameter first wave		Yes	7	Drilling								
	Counterbore first wave		Next MJ2.7	8	Counter-boring								
	Rivet first wave		Next MJ2.7	9	Riveting								
	Drill to final diameter		Yes	10	Drilling								

MJ3	Composite-composite	second wave										
		Counterbore second wave	Next MJ2.10	11	Counter-boring							
		Rivet second wave	Next MJ2.11	12	Riveting							
		Drill to first diameter the witness holes	No	1	Drilling			Cost	Real	€		
		Match holes mesh	No	2	Generic	Manual		U. in cost	Real	€		
		Drill to first diameter all the holes	No	3	Drilling			Time	Real	s		
		Separate and clean	No	4	Generic	Manual		U. in time	Real	s		
		Apply extra structural liquid	No	5	Generic	Manual		Subject	String			
		Close and Cure	No	6	Generic	Manual						
		Separate and check added liquid thickness	No	7	Testing	Dimension measurement						
		Apply sealer to surface	No	8	Sealing							
		Close and Cure	No	9	Generic	Manual						
		Drill to final diameter first wave	Yes	10	Drilling							
		Counterbore first wave	Next MJ3.10	11	Counter-boring							
		Rivet first wave	Next MJ3.11	12	Riveting							
CSI	Combined system installation	Drill to final diameter second wave	Yes	13	Drilling							
		Counterbore second wave	Next MJ3.13	14	Counter-boring							
		Rivet second wave	Next MJ3.14	15	Riveting							
		Install neumatic and fluids systems	Yes	1	System installation	Neumatic and fluids systems		Cost	Real	€		
		Install electronic systems	Yes	1	System installation	Electronic systems		U. in cost	Real	€		
FT	Functional tests	Install electric systems	Yes	1	System installation	Electric systems		Time	Real	s		
								U. in time	Real	s		
								Subject	String			
		Check functionality 1	Yes	1	Testing	Mechanical tests		Cost	Real	€		
		Check functionality 2	Yes	1	Testing	Neumatic and fluids systems		U. in cost	Real	€		
JT1	Standard	Check functionality 3	Yes	1	Testing	Electronic systems		Time	Real	s		
		Check functionality 4	Yes	1	Testing	Electric systems		U. in time	Real	s		
		Check set of systems	Yes	2	Testing	Set of systems		Subject	String			
		Load and Position P1	Yes	1	Positioning at jig	Base comp.	Specific jig	Cost	Real	€	H.est	
		Load and Position P2	Yes	1	Positioning at jig	Added comp.		U. in cost	Real	€	Not H.est	
		Check interfaces and alignment	Yes	2	Testing	Structure alignment		Time	Real	s		
		Nest	Yes	3	Nesting			U. in time	Real	s	Not H.est	
		Assemble	Yes	4	Mechanical	Metal-		Subject	String			

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

JT2	Joint Fuselage-Wing Box	Standard				joint execution	metal					
			Check continuity with masses	Yes	5	Testing	Structural continuity					Set
			Install systems in interfaces	Yes	6	Combined system installation						Set
			Install enclosures and/or closing devices	Yes	6	Addition of small comp.s						Set
			Connect installations	Yes	7	Combined system connexion						Set
			Check functionalities	Yes	7	Functional tests						Set
			Apply sealer at junctions	Yes	8	Sealing						Set
			Retire from jigs	Yes	9	Positioning at jig	Added comp.					Set
JT3	Joint Part-Part	Standard	Load and Position P1	Yes	1	Positioning at jig	Base comp.	Specific jig	Cost	Real	€	Not WB
			Load and Position Wing Box, as WB	Yes	2	Positioning at jig	Added comp.		U. in cost	Real	€	WB
			Check interfaces and alignment	Yes	3	Testing	Structure alignment		Time	Real	s	
			Positionate Wing Box, as WB, into its final position	Yes	4	Nesting			U. in time	Real	s	WB
			Assemble	Yes	5	Mechanical joint execution	Metal-composit e		Subject	String		
			Check continuity with masses	Yes	6	Testing	Structural continuity					Set
			Seal fuel tank	Yes	7	Sealing						Set
			Install systems in interfaces	Yes	7	Combined system installation						Set
			Install enclosures and/or closing devices	Yes	7	Addition of small comp.s						Set
			Connect installations	Yes	8	Combined system connexion						Set
			Check functionalities	Yes	9	Functional tests						Set
			Apply sealer at junctions	Yes	10	Sealing						Set
			Retire from jigs	Yes	11	Positioning at jig	Added comp.					Set

Anexos

			Connect installations	Yes	6	Combined system connexion						Set
			Install enclosures and/or closing devices	Yes	5	Addition of small comp.s						Set
			Check functionalities	Yes	6	Functional tests						Set
			Apply sealer at junctions	Yes	7	Sealing						Set
			Retire from jigs	Yes	8	Positioning at jig	Added comp.					Set
JT4	Joint Composite Comp.s	Standard	Load and Position P1	Yes	1	Positioning at jig	Base comp.	Specific jig	Cost	Real	€	H.est
			Load and Position P2	Yes	1	Positioning at jig	Added comp.		U. in cost	Real	€	Not H.est
			Check interfaces and alignment	Yes	2	Testing	Structure alignment		Time	Real	s	
			Positionate P2 into its final position	Yes	3	Nesting			U. in time	Real	s	Not H.est
			Assemble	Yes	4	Mechanical joint execution	Composite-composite		Subject	String		
			Check continuity with masses	Yes	5	Testing	Structural continuity					Set
			Seal fuel tank	Yes	6	Sealing						Set
			Install systems in interfaces	Yes	6	Combined system installation						Set
			Connect installations	Yes	7	Combined system connexion						Set
			Install enclosures and/or closing devices	Yes	7	Addition of small comp.s						Set
			Check functionalities	Yes	8	Functional tests						Set
			Apply sealer at junctions	Yes	9	Sealing						Set
			Retire from jigs	Yes	10	Positioning at jig	Added comp.					Set
ST	Station Process Execution		Move to the next station	No	2	Moving		Specific base jig	Cost	Real	€	Set
									U. in cost	Real	€	
									Time	Real	s	
									U. in time	Real	s	
									Subject	String		
									Number of shifts	Integer		
CTp1	Complete Transport	Air	Load product	No	1	Connection operation		Specific base jig	Cost	Real	€	Set
			Transport		2	Air transport			U. in cost	Real	€	
			Unload product		3	Connection operation			Time	Real	s	
									U. in time	Real	s	
									Subject	String		
									Origin	String		
									Destiny	String		

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

									Freq.	Real	s ⁻¹	
CTp2	Complete Transport	Sea	Load product	No	1	Connection operation		Specific base jig	Cost	Real	€	Set
			Transport		2	Sea transport			U. in cost	Real	€	
			Unload product		3	Connection operation			Time	Real	s	
									U. in time	Real	s	
									Subject	String		
									Origin	String		
									Destiny	String		
									Freq.	Real	s ⁻¹	
CTp3	Complete Transport	Land	Load product	No	1	Connection operation		Specific base jig	Cost	Real	€	Set
			Transport		2	Land transport			U. in cost	Real	€	
			Unload product		3	Connection operation			Time	Real	s	
									U. in time	Real	s	
									Subject	String		
									Origin	String		
									Destiny	String		
									Freq.	Real	s ⁻¹	

Tabla 61: actividades compuestas del PRD empleado en los casos de estudio.

ID	T	VAR							
			TYPE	ADDITION	SKILLS	MODEL	Name	Type	U
G1	Generic	Manual	Worker	Linear in speed			Cost	Real	€
							U. in cost	Real	€
							Time	Real	s
							U. in time	Real	s
							Subject	String	s
G2		Auto	Generic machine	Linear in speed			Cost	Real	€
							U. in cost	Real	€
							Time	Real	s
							U. in time	Real	s
							Subject	String	
M	Moving		Transporter jig	Linear in capacity			Distance	Real	m
			Worker	No	Technician in sections movements		Cost	Real	€
			Lifter	Linear in capacity			U. in cost	Real	€
							Time	Real	s
							U. in time	Real	s
							Subject	String	
							Req. Cap.	Real	
PJ1	Positioning at jig	Base comp.	Lifter for big heights	Linear in capacity			Distance	Real	m
			Worker	No	Technician in sections movements		Cost	Real	€
					Technician in stock		U. in cost	Real	€
							Time	Real	s
							U. in time	Real	s
							Subject	String	
							Req. Cap.	Real	
PJ2		Added comp.	Lifter	Linear in capacity			Distance	Real	m
			Specific jig	No			Cost	Real	€
			Worker	No	Technician in sections		U. in cost	Real	€

Anexos

				movements				
				Technician in stock		Time	Real	s
						U. in time	Real	s
						Subject	String	
Testing	T1	Structure alignment				Req. Cap.	Real	
			Worker	Linear in speed	Structures verifier	Cost	Real	€
			Alignment meter	Linear in speed		U. in cost	Real	€
						Time	Real	s
	T2	Structural continuity				U. in time	Real	s
						Subject	String	
			Worker	Linear in speed	Structures verifier	Cost	Real	€
			Displacement gage	No		U. in cost	Real	€
	T3	Mechanical tests	Masses	No		Time	Real	s
						U. in time	Real	s
						Subject	String	
			Worker	No	Specialist in mechanical functional tests	Cost	Real	€
	T4	Neumatic and fluids systems	Worker	No	Specialist in mechanical functional tests	U. in cost	Real	€
						Time	Real	s
						U. in time	Real	s
						Subject	String	
	T5	Electronic systems	Worker	Linear in speed	Specialist in neumatic and fluids functional tests	Cost	Real	€
			Barometer	Linear in speed		U. in cost	Real	€
						Time	Real	s
						U. in time	Real	s
	T6	Electric systems				Subject	String	
			Worker	No	Specialist in electronic functional tests	Cost	Real	€
						U. in cost	Real	€
						Time	Real	s
	T7	Set of systems				U. in time	Real	s
						Subject	String	
			Worker	No	Specialist in electric functional tests	Cost	Real	€
						U. in cost	Real	€
	T8	Dimension measurement				Time	Real	s
						U. in time	Real	s
						Subject	String	
			Worker	No	Specialist in systems functional tests	Cost	Real	€
Nesting	N		Precision meter	No		U. in cost	Real	€
						Time	Real	s
						U. in time	Real	s
						Subject	String	
			Worker	No	Technician in sections movements	Distance	Real	m
			Worker	No	Technician in sections movements	Cost	Real	€
			Lifter	Linear in capacity		U. in cost	Real	€
			Specific jig	No		Time	Real	s

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

						U. in time	Real	s	
						Subject	String		
						Req. Cap.	Real		
SI1	System installation	Neumatic and fluids systems	Worker	Linear in speed	Neumatic and fluids systems installer		Cost	Real	€
							U. in cost	Real	€
					Neumatic and fluids systems verifier		Time	Real	s
							U. in time	Real	s
							Subject	String	
SI2		Electronic systems	Worker	Linear in speed	Electronic systems installer		Cost	Real	€
							U. in cost	Real	€
					Electronic systems verifier		Time	Real	s
							U. in time	Real	s
							Subject	String	
SI3		Electric systems					Real	s	
			Worker	Linear in speed	Electric systems installer		Cost	Real	€
							U. in cost	Real	€
					Electric systems verifier		Time	Real	s
							U. in time	Real	s
CS	Combined system conexon					Subject	String		
		Worker	Linear in speed	Neumatic and fluids systems installer		Cost	Real	€	
				Electronic systems installer		U. in cost	Real	€	
						Time	Real	s	
						U. in time	Real	s	
AC	Addition of small comp.s					Subject	String		
		Worker	Linear in speed			Cost	Real	€	
						U. in cost	Real	€	
						Time	Real	s	
						U. in time	Real	s	
S	Sealing					N. el.s	Integer		
						Subject	String		
		Worker	Linear in speed	Sealer		Cost	Real	€	
						U. in cost	Real	€	
			Sealing gel applier	Linear in speed		Time	Real	s	
JB	Joining by bolts					U. in time	Real	s	
						Subject	String		
		Worker	Linear in speed			Cost	Real	€	
						U. in cost	Real	€	
						Time	Real	s	
D1	Drilling	Manual					U. in time	Real	s
							N. el.s	Integer	
							Subject	String	
			Worker	Linear in speed	Machining Operator		Cost	Real	€
							U. in cost	Real	€
		Auto	Driller	Linear in speed			Time	Real	s
							U. in time	Real	s
							N. el.s	Integer	
							Subject	String	
D2		Automatic drilling machine	No			Cost	Real	€	
		Worker	No	Robotic operator		U. in cost	Real	€	
						Time	Real	s	
						U. in time	Real	s	

Anexos

					N. el.s	Integer		
					Subject	String		
C1	Manual	Worker	Linear in speed	Machining Operator	Cost	Real	€	
					U. in cost	Real	€	
		Counterborer	Linear in speed		Time	Real	s	
					U. in time	Real	s	
					N. el.s	Integer		
C2	Auto				Subject	String		
		Automatic CNC machine	No		Cost	Real	€	
		Worker	No	Robotic operator	U. in cost	Real	€	
					Time	Real	s	
					U. in time	Real	s	
R1	Manual				N. el.s	Integer		
					Subject	String		
		Worker	Linear in speed	Machining Operator	Cost	Real	€	
					U. in cost	Real	€	
		Rivet applier	Linear in speed		Time	Real	s	
R2	Auto				U. in time	Real	s	
					N. el.s	Integer		
		Automatic CNC machine	No		Cost	Real	€	
					U. in cost	Real	€	
		Worker	No	Robotic operator	Time	Real	s	
Tp3	Barge				U. in time	Real	s	
					N. el.s	Integer		
					Subject	String		
					Origin	String		
					Destiny	String		
Tp4	Load ship				Frequency	Real	1/tc	
					Req. Cap.	Real	kg	
		Sea transport mean	No		BCG_AB	Cost	Real	€
					U. in cost	Real	€	
					Time	Real	s	
Tp5	Truck				U. in time	Real	s	
					N. el.s	Integer		
					Subject	String		
					Origin	String		
					Destiny	String		
					Frequency	Real	1/tc	
					Req. Cap.	Real	kg	
		Land transport mean	No		Truck	Cost	Real	€
					U. in cost	Real	€	
					Time	Real	s	
					U. in time	Real	s	
					N. el.s	Integer		
					Subject	String		
					Origin	String		
					Destiny	String		
					Frequency	Real	1/tc	
					Req. Cap.	Real	kg	

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

Tp1	Air transport	Plane regular	Air transport mean	No		APC	Cost	Real	€
							U. in cost	Real	€
							Time	Real	s
							U. in time	Real	s
							N. el.s	Integer	
							Subject	String	
							Origin	String	
							Destiny	String	
							Frequency	Real	1/tc
							Req. Cap.	Real	kg
Tp2	Air transport	Beluga	Air transport mean	No		Beluga	Cost	Real	€
							U. in cost	Real	€
							Time	Real	s
							U. in time	Real	s
							N. el.s	Integer	
							Subject	String	
							Origin	String	
							Destiny	String	
							Frequency	Real	1/tc
							Req. Cap.	Real	kg
Cn	Connection operation		Transporter jig	Linear in capacity			Cost	Real	€
			Worker	No	Technician in sections movements		U. in cost	Real	€
			Worker	No			Time	Real	s
			Lifter	Linear in capacity			U. in time	Real	s
							N. el.s	Integer	
							Subject	String	
							Req. Cap.	Real	kg

Tabla 62: actividades simples del PRD empleado en los casos de estudio..

13.2 Modelos digitales

Representación tridimensional y modelos de recursos a los que se ha asociado en los casos de estudio

Utillajes para secciones del fuselaje

Utillajes para secciones de las alas

Utillajes para secciones del estabilizador horizontal.

Recursos para operaciones de montaje.

Recurso humano o trabajador y recurso genérico

Tabla 63: modelos tridimensionales creados para representar recursos.

13.3 Sistema evaluador basado en Lógica Borrosa

13.3.1 Cálculo de la pertenencia de una variable con una incertidumbre asociada

En este apartado se demuestra que la pertenencia de una variable X_i , que sigue una distribución normal de media E_i y desviación típica σ_i , a un sub conjunto borroso, de perfil triangular y parámetros característicos a , b y c , se puede calcular según la Ec. 6.2.19, mostrada en el apartado 6.2.3.4. Se parte de la Ec. 13.3.1, donde se halla presente la definición matemática de la densidad de probabilidad de una función normal, como recoge la Ec. 13.3.2. La Ec. 13.3.2 define la función $f_N(a,b)$, como la probabilidad de que la variable X_i tenga un valor comprendido entre a y b .

$$\mu_Z(X_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \left(\int_a^b \frac{x-a}{b-a} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-E_i}{\sigma_i} \right)^2} dx + \int_b^c \frac{c-x}{c-b} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-E_i}{\sigma_i} \right)^2} dx \right) \quad \text{Ec. 13.3.1}$$

Se separa la expresión de la Ec. 13.3.1 en I_1 e I_2 , según la Ec. 13.3.3. El valor de I_1 viene dado en la Ec. 13.3.4, donde I_{11} se define según la Ec. 13.3.5. Se aplica en dicha expresión el cambio de variable determinado por la Ec. 13.3.6.

$$\int_a^b \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-E_i}{\sigma_i} \right)^2} dx = P[N(E_i, \sigma_i) \leq b] - P[N(E_i, \sigma_i) \leq a] = f_N(a, b) \quad \text{Ec. 13.3.2}$$

$$\mu_Z(X_i) = I_1 + I_2 \quad \text{Ec. 13.3.3}$$

$$I_1 = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_a^b \frac{x-a}{b-a} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-E_i}{\sigma_i} \right)^2} dx = \frac{1}{(b-a)} \{I_{11} - a \cdot f_N(a, b)\} \quad \text{Ec. 13.3.4}$$

$$I_{11} = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_a^b x \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-E_i}{\sigma_i} \right)^2} dx = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_{a-E_i}^{b-E_i} (z + E_i) \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z}{\sigma_i} \right)^2} dz \quad \text{Ec. 13.3.5}$$

$$z = x - E_i \quad \text{Ec. 13.3.6}$$

Según la Ec. 13.3.7, I_{11} se descompone, dando origen a I_{111} , cuyo valor viene dado por la Ec. 13.3.8. Si en la primera parte de la Ec. 13.3.7 se invierte el cambio de variable de la Ec. 13.3.6, se obtiene la función f_N . Para resolver I_{111} se puede aplicar el cambio de variable dado por la Ec. 13.3.9, con lo que se obtiene una integral sencilla. Sustituyendo todo lo anterior en la Ec. 13.3.7 se obtiene la expresión de I_{11} , en la Ec. 13.3.10.

$$I_{11} = E_i \int_a^b \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-E_i}{\sigma_i} \right)^2} dx + I_{111} \quad \text{Ec. 13.3.7}$$

$$I_{111} = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_{a-E_i}^{b-E_i} z \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z}{\sigma_i} \right)^2} dz = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\left(\frac{a-E_i}{\sigma_i}\right)^2}^{-\left(\frac{b-E_i}{\sigma_i}\right)^2} e^t dt \quad \text{Ec. 13.3.8}$$

$$t = -(z/\sigma_i)^2/2 \quad \text{Ec. 13.3.9}$$

$$I_{11} = E_i \cdot f_N(a, b) + \frac{\sigma_i}{\sqrt{2\pi}} \left(e^{-\left(\frac{a-E_i}{2\sigma_i}\right)^2} - e^{-\left(\frac{b-E_i}{2\sigma_i}\right)^2} \right) \quad \text{Ec. 13.3.10}$$

La segunda parte de la expresión de la pertenencia, I_2 , vendría dada por la Ec. 13.3.11, donde I_{21} se define según la Ec. 13.3.12, que se puede resolver teniendo en cuenta que coincide con la expresión I_{11} , si se reemplaza en esta última a por b y b por c. Al sustituir la Ec. 13.3.10 en la Ec. 13.3.4, y la Ec. 13.3.12 en la Ec. 13.3.11, y teniendo en cuenta que los perfiles de los conjuntos borrosos son simétricos, como establece la Ec. 13.3.13, se obtiene la expresión final de la pertenencia, que queda recogida en la Ec. 13.3.14. Dicho resultado coincide con la Ec. 6.2.19, en el apartado 6.2.3.4.

$$I_2 = \frac{1}{(c-b)} \{c \cdot f_N(b, c) - I_{21}\} \quad \text{Ec. 13.3.11}$$

$$I_{21} = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_b^c x \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-E_i}{\sigma_i} \right)^2} dx =$$

$$= E_i \cdot f_N(b, c) + \frac{\sigma_i}{\sqrt{2\pi}} \left(e^{-\left(\frac{b-E_i}{2\sigma_i}\right)^2} - e^{-\left(\frac{c-E_i}{2\sigma_i}\right)^2} \right) \quad \text{Ec. 13.3.12}$$

$$b - a = c - b \quad \text{Ec. 13.3.13}$$

$$\mu_Z(X_i) = \frac{1}{(b-a)} \left[\frac{\sigma_i}{\sqrt{2\pi}} \left\{ e^{-\left(\frac{c-E_i}{2\sigma_i}\right)^2} + e^{-\left(\frac{a-E_i}{2\sigma_i}\right)^2} - 2e^{-\left(\frac{b-E_i}{2\sigma_i}\right)^2} \right\} + (E_i - a) \cdot f_N(a, b) + (c - E_i) \cdot f_N(b, c) \right] \quad \text{Ec. 13.3.14}$$

13.3.2 Reglas del motor de inferencia

A	A	A	9
A	A	B	8
A	A	C	7
A	A	D	6
A	A	E	5
A	B	A	8
A	B	B	7
A	B	C	7
A	B	D	6
A	B	E	5
A	C	A	7
A	C	B	7
A	C	C	6
A	C	D	5
A	C	E	4
A	D	A	6
A	D	B	5
A	D	C	3
A	D	D	3
A	D	E	2
A	E	A	5
A	E	B	4
A	E	C	2
A	E	D	1
A	E	E	1

B	A	A	9
B	A	B	8
B	A	C	7
B	A	D	5
B	A	E	5
B	B	A	8
B	B	B	7
B	B	C	6
B	B	D	5
B	B	E	5
B	C	A	7
B	C	B	7
B	C	C	5
B	C	D	5
B	C	E	4
B	D	A	7
B	D	B	6
B	D	C	5
B	D	D	4
B	D	E	2
B	E	A	3
B	E	B	3
B	E	C	2
B	E	D	2
B	E	E	1

C	A	A	7
C	A	B	6
C	A	C	5
C	A	D	5
C	A	E	4
C	B	A	6
C	B	B	5
C	B	C	5
C	B	D	4
C	B	E	3
C	C	A	5
C	C	B	5
C	C	C	4
C	C	D	4
C	C	E	3
C	D	A	5
C	D	B	4
C	D	C	3
C	D	D	2
C	D	E	2
C	E	A	3
C	E	B	2
C	E	C	2
C	E	D	1
C	E	E	1

D	A	A	3
D	A	B	2
D	A	C	2
D	A	D	2
D	A	E	1
D	B	A	2
D	B	B	2
D	B	C	2
D	B	D	2
D	B	E	1
D	C	A	2
D	C	B	2
D	C	C	2
D	C	D	1
D	C	E	1
D	D	A	2
D	D	B	2
D	D	C	1
D	D	D	1
D	D	E	1
D	E	A	1
D	E	B	1
D	E	C	1
D	E	D	1
D	E	E	1

E	A	A	1
E	A	B	1
E	A	C	1
E	A	D	1
E	A	E	1
E	B	A	1
E	B	B	1
E	B	C	1
E	B	D	1
E	B	E	1
E	C	A	1
E	C	B	1
E	C	C	1
E	C	D	1
E	C	E	1
E	D	A	1
E	D	B	1
E	D	C	1
E	D	D	1
E	D	E	1
E	E	A	1
E	E	B	1
E	E	C	1
E	E	D	1
E	E	E	1

Tabla 64: reglas del motor de inferencia del sistema de Lógica Borrosa.

13.4 Casos de estudio

Times truck	Illescas, Spain	Sevilla, Spain	Puerto Real, Spain	Castellon, Spain	Valencia, Spain	Bilbao, Spain	Toulouse, France	Saint-Nazaire, France	Nantes, France	Albert, France	Marseille, France	Caen, France	Hamburg, Germany	Bremen, Germany	Nordenham, Germany	Varel, Germany	Laupheim, Germany	Bristol, UK	Brighton, UK	Portsmouth, UK
TIMES BY ROAD (h)																				
Getafe, Sp	0,3	4,8	6	4	3,8	4,7	7,7	10,4	9,75	13,6	10,2	12,3	20,6	19,6	20,1	19,5	19,2	X	X	X
Illescas, Sp		4,7	5,8	4,1	3,8	4,9	7,9	10,6	10	13,8	10,4	12,3	20,8	19,8	20,3	19,7	18,7	X	X	X
Sevilla, Sp			1,3	6,8	6,25	8,1	11,7	14,5	14	17,7	14,2	16,5	25	23,6	24	23,5	22	X	X	X
Puerto Real, Sp				8	7,34	9,13	12,7	15,7	15,1	19	15,5	17,4	26	25	25	25	23,1	X	X	X
Castellon, Sp					1	5,8	6,1	11,7	11,1	13,5	7,25	13,5	19,5	18,8	19,3	18,8	15	X	X	X
Valencia, Sp						5,7	6,8	11,6	11,1	14,1	8	13,5	20,2	19,8	20,1	19,8	16	X	X	X
Bilbao, Sp							4,35	7,04	6,34	10,2	7,95	8,77	17,2	16,2	16,6	16,2	14,7	X	X	X
Toulouse, Fr								5,83	5,18	7,84	3,75	7,55	15,1	14,1	14,1	13,9	11,1	X	X	X
S-Naz., Fr									1	5,5	9,6	3,1	12,8	11,7	11,8	11,3	10,7	X	X	X
Nantes, Fr										5,03	8,92	2,9	12,3	11,2	11,3	10,8	10,2	X	X	X
Albert, Fr											8,56	2,84	7,38	6,33	6,8	6,17	6,95	X	X	X
Mars., Fr												9,1	14,2	13	13,5	13	9,1	X	X	X
Caen, Fr													10,3	9,26	9,17	8,7	9,1	X	X	X
Hamb., Ge														1,3	1,9	1,9	7,1	X	X	X
Bremen, Ge															0,9	0,8	6,8	X	X	X
Nord., Ge																0,6	7,5	X	X	X
Varel, Ge																	7,5	X	X	X
Laup., Ge																		X	X	X
Bristol, UK																			3,1	2,0
Bright., UK																				1,5
DISTANCES BY SHIP (km)																				
Getafe, Sp	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Illescas, Sp		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Sevilla, Sp			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
P. R., Sp				887	850	1496	X	1957	2021	X	1742	2265	3582	X	4961	4934	X	2823	3148	3086
Cast., Sp				48	2362	X	2827	2891	X	865	3124	4438	X	5821	5792	X	3688	3997	3936	
Valencia, Sp					2313	X	2780	2845	X	906	3173	4387	X	5769	5741	X	3636	3944	3884	
Bilbao, Sp						X	382	446	X	1612	1669	1885	X	4275	4250	X	2128	2451	2395	
Toulouse, Fr							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
S-N., Fr								64	X	3688	842	1482	X	3875	3854	X	759	981	898	
Nantes, Fr									X	3742	906	1546	X	3939	3918	X	804	1027	961	
Albert, Fr										X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Mars., Fr											3992	5326	X	6692	6668	X	4572	4893	4825	
Caen, Fr												1298	X	1130	1005	X	485	606	553	
Hamb., Ge													X	167	201	X	2128	1437	1493	
Bremen, Ge														76	277	X	2028	1352	1402	
Nord., Ge															51	X	1952	1274	1327	
Varel, Ge																X	1904	1226	1278	
Laup., Ge																	X	X	X	
Bristol, UK																		411	461	
Bright., UK																				53
TIMES BY PLANE (h)																				
Getafe, Sp	0,02	1	1,17	0,84	0,83	0,91	1,25	1,58	1,59	X	1,58	X	2,83	2,84	X	X	X	2,17	2,25	X
Illescas, Sp		1	1,17	0,84	0,83	0,91	1,25	1,58	1,59	X	2,58	X	2,83	2,84	X	X	X	2,17	2,25	X
Sevilla, Sp			0,17	0,8	0,84	1,33	1,67	1,91	1,91	X	2,08	X	3,17	3,18	X	X	X	2,5	2,6	X
P. R., Sp				0,83	0,9	1,37	1,7	1,95	1,92	X	2,15	X	3,18	3,19	X	X	X	2,5	2,6	X
Cast., Sp					0,15	1,17	1,22	1,75	1,75	X	0,5	X	2,85	2,86	X	X	X	2,5	2,41	X
Valencia, Sp						1,17	1,22	1,75	1,75	X	1,5	X	2,85	2,86	X	X	X	2,5	2,41	X
Bilbao, Sp							1,1	1,42	1,45	X	1,65	X	2,77	2,78	X	X	X	1,75	1,58	X

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

Toulouse, Fr								1	0,95	X		1	X	2,25	2	X	X	X	1,83	1,8	X
S-N., Fr									0,08	X		1,25	X	2,5	2,45	X	X	X	1,27	1,25	X
Nantes, Fr										X		1,24	X	2,5	2,45	X	X	X	1,27	1,25	X
Albert, Fr											X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Mars., Fr												X		3	2,95	X	X	X	2,75	2,73	X
Caen, Fr													X	X	X	X	X	X	X	X	X
Hamb., Ge															0,2	X	X	X	1,67	1,69	X
Bremen, Ge																X	X	X	1,69	1,7	X
Nord., Ge																	X	X	X	X	X
Varel, Ge																	X	X	X	X	X
Laup., Ge																		X	X	X	X
Bristol, UK																				0,2	X
Bright., UK																					X

Tabla 65: tiempos y distancias entre localizaciones posibles para la red logística.

13.4.1 Soluciones de la distribución logística de las alternativas

NODE OF THE NETWORK	LOCATION	MEAN	COST (€)	N	Ut (h)
Plant for Aircraft1	Puerto Real, Sp				
Origin of CFU	Toulouse, Fr	Truck	3716,75	5	250,63
Origin of HSCB	Bristol, UK	BCG_AB	15606,83	27	4577,40
Origin of WB	Toulouse, Fr	Truck	5863,41	3	243,90
Origin of VSU	Saint-Nazaire, Fr	Truck	1283,36	24	344,35
Origin of FFU	Toulouse, Fr	Truck	3078,18	7	260,40
Origin of RFBU	Nantes, Fr	Truck	2362,16	9	292,68
Origin of VSR	Saint-Nazaire, Fr	Truck	1299,71	24	344,35
Origin of HSRR	Bristol, UK	BCG_AB	11259,45	27	4577,40
Origin of HSLR	Bristol, UK	BCG_AB	11259,45	27	4577,40
Origin of VSM	Saint-Nazaire, Fr	Truck	3455,81	7	314,33
Origin of HSRM	Bristol, UK	BCG_AB	27545,71	27	4577,40
Origin of HSLM	Bristol, UK	BCG_AB	14904,91	27	4577,40
Origin of FFL	Toulouse, Fr	Truck	3199,34	7	260,40
Origin of RFBL	Toulouse, Fr	Truck	2114,97	9	248,65
Origin of HSRL	Bristol, UK	BCG_AB	2559,70	27	4577,40
Origin of HSLL	Bristol, UK	BCG_AB	2559,70	27	4577,40
Origin of VSF	Saint-Nazaire, Fr	Truck	1230,75	25	348,03
Origin of HSRF	Bristol, UK	BCG_AB	8023,38	27	4577,40
Origin of RFF	Toulouse, Fr	Truck	6135,66	3	243,90
Origin of HSLF	Bristol, UK	BCG_AB	8023,38	27	4577,40
Origin of FFB	Toulouse, Fr	Truck	2156,47	9	248,65
Origin of RWB2	Saint-Nazaire, Fr	Truck	1935,30	13	312,09
Origin of LWB1	Saint-Nazaire, Fr	Truck	2464,16	9	304,67
Origin of LWB2	Hamburg, Ge	Truck	2893,26	13	500,27
Origin of RWB1	Saint-Nazaire, Fr	Truck	2464,15	9	304,67
Origin of RWT	Saint-Nazaire, Fr	Truck	292,63	29	363,81
Origin of LFAN1	Bristol, UK	CS6500TEU	28977,75	29	1273,68
Origin of LFAN2	Laupheim, Ge	Truck	3515,80	9	441,39
Origin of LWF1	Bristol, UK	BCG_AB	22000,69	27	4577,40
Origin of LWF2	Bristol, UK	BCG_AB	25069,81	27	4577,40
Origin of LWF3	Bristol, UK	BCG_AB	25838,89	27	4577,40
Origin of LWS1	Bristol, UK	BCG_AB	8573,92	27	4577,40
Origin of LWS2	Bristol, UK	BCG_AB	9486,29	27	4577,40
Origin of LWS3	Brighton, UK	BCG_AB	11088,93	27	5103,48
Origin of LWT	Saint-Nazaire, Fr	Truck	292,63	29	363,81
Origin of RFAN1	Bristol, UK	CS6500TEU	28977,87	29	1273,68
Origin of RFAN2	Bristol, UK	CS6500TEU	28977,87	29	1273,68
Origin of RWF1	Bristol, UK	BCG_AB	22000,69	27	4577,40
Origin of RWF2	Bristol, UK	BCG_AB	25069,81	27	4577,40
Origin of RWF3	Bristol, UK	BCG_AB	25852,44	27	4577,40
Origin of RWS1	Bristol, UK	BCG_AB	8573,92	27	4577,40

Anexos

Origin of RWS2	Bristol, UK	BCG_AB	9486,29	27	4577,40
Origin of RWS3	Bristol, UK	BCG_AB	10079,64	27	4577,40
Origin of CFL	Toulouse, Fr	Truck	12698,30	1	240,46
TOTAL COST			454250,13		

Tabla 66: solución obtenida para la distribución logística de la alternativa A1 del CU2.

NODE OF THE NETWORK	LOCATION	MEAN	COST (€)	N	Ut (h)
Plant for Aircraft1	Puerto Real, Sp				
Origin of WB	Nantes, Fr	Truck,	6802,46	3	288,65
Origin of LFAN1	Laupheim, Ge	Truck,	3515,80	9	441,39
Origin of LFAN2	Laupheim, Ge	Truck,	3515,80	9	441,39
Origin of RFAN1	Laupheim, Ge	Truck,	3515,96	9	441,39
Origin of RFAN2	Laupheim, Ge	Truck,	3515,96	9	441,39
Plant for H. Stab	Bristol, UK	CS6500TEU,	36674,12	29	1324,20
Plant for V. Stabr	Laupheim, Ge	Truck,	8154,93	3	438,73
Plant for Left Wing	Nantes, Fr	Truck,	8385,47	2	286,84
Plant for R. Wing	Nantes, Fr	Truck,	8390,13	2	286,84
Plant for Nose Fus.	Nantes, Fr	Truck,	6112,06	3	288,65
Plant for Rear Sect.	Laupheim, Ge	Truck,	16709,37	1	436,83
Plant for Fuselage	Puerto Real, Sp				
Origin of CFL	Nantes, Fr	Truck,	14962,17	1	285,75
Origin of CFU	Nantes, Fr	Truck,	4257,05	5	294,36
Origin of FFB	Nantes, Fr	Truck,	2477,37	9	292,68
Origin of RFF	Nantes, Fr	Truck,	5132,55	3	198,50
Origin of RFBU	Nantes, Fr	Truck,	1743,84	9	204,31
Origin of RFBL	Nantes, Fr	Truck,	1793,69	9	204,31
Origin of FFL	Nantes, Fr				
Origin of FFU	Nantes, Fr				
Origin of VSM	Laupheim, Ge				
Origin of VSU	Laupheim, Ge				
Origin of VSR	Laupheim, Ge				
Origin of VSF	Laupheim, Ge				
Origin of RWB1	Saint-Nazaire, Fr	Truck,	569,00	9	67,61
Origin of RWB2	Saint-Nazaire, Fr	Truck,	556,44	13	95,65
Origin of RWT	Saint-Nazaire, Fr	Truck,	131,56	29	210,01
Origin of RWF1	Brighton, UK	BCG_AB,	8753,12	29	1676,84
Origin of RWF2	Brighton, UK	BCG_AB,	9982,62	29	1676,84
Origin of RWF3	Brighton, UK	BCG_AB,	10296,15	29	1676,84
Origin of RWS1	Brighton, UK	BCG_AB,	3374,29	29	1676,84
Origin of RWS2	Brighton, UK	BCG_AB,	3739,79	29	1676,84
Origin of RWS3	Brighton, UK	BCG_AB,	3977,49	29	1676,84
Origin of LWB1	Saint-Nazaire, Fr	Truck,	569,01	9	67,61
Origin of LWB2	Saint-Nazaire, Fr	Truck,	556,40	13	95,65
Origin of LWF1	Brighton, UK	BCG_AB,	8753,12	29	1676,84
Origin of LWF2	Brighton, UK	BCG_AB,	9982,62	29	1676,84
Origin of LWF3	Brighton, UK	BCG_AB,	10290,72	29	1676,84
Origin of LWS1	Brighton, UK	BCG_AB,	3374,29	29	1676,84
Origin of LWS2	Brighton, UK	BCG_AB,	3739,79	29	1676,84
Origin of LWS3	Brighton, UK	BCG_AB,	3944,63	29	1676,84
Origin of LWT	Hamburg, Ge	Truck,	254,52	29	312,15
Origin of HSRM	Bristol, UK				
Origin of HSCB	Bristol, UK				
Origin of HSRR	Bristol, UK				
Origin of HSLR	Bristol, UK				
Origin of HSLM	Bristol, UK				
Origin of HSRL	Bristol, UK				
Origin of HSLL	Bristol, UK				
Origin of HSRF	Bristol, UK				
Origin of HSLF	Bristol, UK				
TOTAL COST			218504,2897		

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

Tabla 67: solución obtenida para la distribución logística de la alternativa A2 del CU2.

NODE OF THE NETWORK	LOCATION	MEAN	COST (€)	N	Ut (h)
Plant for Aircraft1	Puerto Real, Sp				
Origin of WB	Nantes, Fr	Truck,	6802,46	3	288,65
Origin of LFAN1	Laupheim, Ge	Truck,	3515,80	9	441,39
Origin of LFAN2	Laupheim, Ge	Truck,	3515,80	9	441,39
Origin of RFAN1	Laupheim, Ge	Truck,	3515,96	9	441,39
Origin of RFAN2	Laupheim, Ge	Truck,	3515,96	9	441,39
Plant for H. Stab	Nantes, Fr	Truck,	4715,25	5	294,36
Plant for V. Stabr	Nantes, Fr	Truck,	5585,00	3	288,65
Plant for Left Wing	Nantes, Fr	Truck,	8385,47	2	286,84
Plant for R. Wing	Laupheim, Ge	Truck,	12427,78	2	437,54
Plant for Fuselage	Puerto Real, Sp	Truck,	16709,37	1	436,83
Plant for Rear Sect.	Laupheim, Ge	Truck,	8924,51	3	438,73
Plant for Nose Fus.	Laupheim, Ge	CS6500TEU,	18848,54	29	550,48
Plant for LWInner	Bristol, UK	Truck,	700,06	9	75,31
Origin of LWB1	Portsmouth, UK	Truck,	3340,28	6	247,35
Origin of LWF1	Bristol, UK				
Origin of LWF2	Bristol, UK				
Origin of LWS1	Bristol, UK				
Origin of LWS2	Bristol, UK				
Plant for LWOuter	Hamburg, Ge	Truck,	3043,60	4	146,07
Plant for RWInner	Hamburg, Ge	BCG_AB,	16847,15	28	3453,27
Origin of RWB1	Hamburg, Ge				
Origin of RWF1	Bristol, UK	BCG_AB,	19205,72	28	3453,27
Origin of RWF2	Bristol, UK	BCG_AB,	6528,87	28	3453,27
Origin of RWS1	Bristol, UK	BCG_AB,	5025,36	29	2337,32
Origin of RWS2	Brighton, UK	Truck,	2399,02	6	166,08
Plant for RWOuter	Nordenham, Ge	Truck,	14962,17	1	285,75
Origin of CFL	Nantes, Fr	Truck,	4257,05	5	294,36
Origin of CFU	Nantes, Fr	Truck,	2477,37	9	292,68
Origin of FFB	Nantes, Fr	CS6500TEU,	13710,15	29	502,66
Plant for HStab_Right	Brighton, UK	BCG_AB,	5034,05	29	1319,17
Origin of HSRR	Brighton, UK				
Origin of HSRM	Brighton, UK				
Origin of HSRL	Brighton, UK				
Origin of HSRF	Brighton, UK				
Origin of HSCB	Bristol, UK	Truck,	1420,71	14	236,58
Plant for HStab_Left	Nordenham, Ge	Truck,	5132,55	3	198,50
Origin of RFF	Nantes, Fr	Truck,	1743,84	9	204,31
Origin of RFBU	Nantes, Fr	Truck,	1793,69	9	204,31
Origin of RFBL	Nantes, Fr	Truck,	2764,68	7	218,46
Origin of FFL	Nantes, Fr	Truck,	2659,98	7	218,46
Origin of FFU	Nantes, Fr	Truck,	2554,29	7	218,46
Origin of VSM	Laupheim, Ge	Truck,	999,80	24	259,79
Origin of VSU	Laupheim, Ge	Truck,	1012,55	24	259,79
Origin of VSR	Laupheim, Ge	Truck,	1060,80	25	293,60
Origin of VSF	Hamburg, Ge	BCG_AB,	19796,74	28	3453,27
Origin of LWB2	Hamburg, Ge				
Origin of LWF3	Bristol, UK	BCG_AB,	5300,60	29	2337,32
Origin of LWS3	Brighton, UK	Truck,	639,64	13	100,34
Origin of LWT	Hamburg, Ge				
Origin of RWB2	Hamburg, Ge	Truck,	141,28	29	212,19
Origin of RWT	Hamburg, Ge	BCG_AB,	12428,38	29	2074,45
Origin of RWF3	Brighton, UK	BCG_AB,	4801,19	29	2074,45
Origin of RWS3	Brighton, UK	BCG_AB,	7134,53	29	2074,45
Origin of HSLM	Brighton, UK	BCG_AB,	5371,71	29	2074,45
Origin of HSLR	Brighton, UK	BCG_AB,	1207,68	29	2159,89
Origin of HSLL	Portsmouth, UK	BCG_AB,	3806,86	29	2074,45

Anexos

Origin of HSLF	Brighton, UK	Truck,	6802,46	3	288,65
TOTAL COST			275764,27		

Tabla 68: solución obtenida para la distribución logística de la alternativa A3 del CU2.

NODE OF THE NETWORK	LOCATION	MEAN	COST (€)	N	Ut (h)
Plant for Aircraft1	Puerto Real, Sp				
Origin of CFU	Nantes, Fr	Truck,	4257,05	5	294,36
Origin of HSCB	Bristol, UK	BCG_AB,	15606,83	27	4577,40
Origin of WB	Nantes, Fr	Truck,	6802,46	3	288,65
Origin of RFBU	Nantes, Fr	Truck,	2362,16	9	292,68
Origin of RFB	Nantes, Fr	Truck,	2429,68	9	292,68
Origin of RFF	Nantes, Fr	Truck,	7118,31	3	288,65
Origin of LFAN1	Bristol, UK	CS6500TEU,	28977,75	29	1273,68
Origin of LFAN2	Bristol, UK	CS6500TEU,	28977,74	29	1273,68
Origin of RFAN1	Laupheim, Ge	Truck,	3515,96	9	441,39
Origin of RFAN2	Bristol, UK	CS6500TEU,	28977,87	29	1273,68
Origin of CFL	Nantes, Fr	Truck,	14962,17	1	285,75
Plant for LWiner	Puerto Real, Sp				
Plant for LWOuter	Nantes, Fr	Truck,	3903,89	6	298,23
Plant for RWiner	Nantes, Fr	Truck,	5443,06	4	291,16
Plant for RWOuter	Nantes, Fr	Truck,	3909,41	6	298,23
Plant for V. Stab.	Hamburg, Ge	Truck,	9086,52	3	493,30
Plant for HStab_Left	Bristol, UK	CS6500TEU,	28091,50	29	1273,68
Plant for HStab_Right	Brighton, UK	CS6500TEU,	31547,99	29	1416,56
Plant for Front Fus.	Hamburg, Ge	Truck,	13467,03	2	492,25
Origin of FFL	Nantes, Fr	Truck,	3121,28	7	252,76
Origin of FFU	Nantes, Fr	Truck,	3003,08	7	252,76
Origin of FFB	Nantes, Fr	Truck,	2097,64	9	240,63
Origin of VSM	Hamburg, Ge				
Origin of VSU	Hamburg, Ge				
Origin of VSR	Hamburg, Ge				
Origin of VSF	Hamburg, Ge				
Origin of RWB1	Hamburg, Ge	Truck,	2015,74	9	240,63
Origin of RWF1	Bristol, UK	BCG_AB,	7116,56	29	1319,17
Origin of RWF2	Bristol, UK	BCG_AB,	8116,19	29	1319,17
Origin of RWS1	Bristol, UK	BCG_AB,	2743,41	29	1319,17
Origin of RWS2	Bristol, UK	BCG_AB,	3040,57	29	1319,17
Origin of LWB1	Hamburg, Ge	Truck,	3781,13	9	495,67
Origin of LWF1	Brighton, UK	BCG_AB,	24402,28	27	5103,48
Origin of LWF2	Bristol, UK	BCG_AB,	25069,81	27	4577,40
Origin of LWS1	Brighton, UK	BCG_AB,	9509,84	27	5103,48
Origin of LWS2	Bristol, UK	BCG_AB,	9486,29	27	4577,40
Origin of LWB2	Saint-Nazaire, Fr	Truck,	556,40	13	95,65
Origin of LWF3	Bristol, UK	BCG_AB,	8366,68	29	1319,17
Origin of LWS3	Bristol, UK	BCG_AB,	3207,10	29	1319,17
Origin of LWT	Hamburg, Ge	Truck,	254,52	29	312,15
Origin of RWB2	Saint-Nazaire, Fr	Truck,	556,44	13	95,65
Origin of RWF3	Bristol, UK	BCG_AB,	8371,09	29	1319,17
Origin of RWS3	Bristol, UK	BCG_AB,	3233,83	29	1319,17
Origin of RWT	Saint-Nazaire, Fr	Truck,	131,56	29	210,01
Origin of HSRM	Brighton, UK				
Origin of HSRR	Brighton, UK				
Origin of HSRL	Brighton, UK				
Origin of HSRF	Brighton, UK				
Origin of HSLM	Bristol, UK				
Origin of HSLR	Bristol, UK				
Origin of HSL	Bristol, UK				
Origin of HSLF	Bristol, UK				
TOTAL COST			367618,82		

Tabla 69: solución obtenida para la distribución logística de la alternativa A4 del CU2.

Metodología para la generación y evaluación multicriterio de soluciones conceptuales de diseño de líneas de montaje final de producto en el sector aeronáutico.

NODE OF THE NETWORK	LOCATION	MEAN	COST (€)	N	Ut (h)	STOPS
Plant for Aircraft1	Puerto Real, Sp					
Origin of RFBU	Nantes, Fr	Truck,	2362,16	9	292,68	
Origin of RFBL	Nantes, Fr	Truck,	2429,68	9	292,68	
Origin of RFF	Nantes, Fr	Truck,	7118,31	3	288,65	
Origin of LFAN1	Laupheim, Ge	Truck,	3515,80	9	441,39	
Origin of LFAN2	Laupheim, Ge	Truck,	3515,80	9	441,39	
Origin of RFAN1	Laupheim, Ge	Truck,	3515,96	9	441,39	
Origin of RFAN2	Laupheim, Ge	Truck,	3515,96	9	441,39	
Plant for Body & Wings	Puerto Real, Sp					
Plant for H. Stab.	Laupheim, Ge	Truck,	6710,12	5	442,51	
Plant for V. Stab.	Laupheim, Ge	Truck,	8154,93	3	438,73	
Plant for Front Fus.	Nantes, Fr	Truck,	8133,81	2	286,84	
Plant for Fuselage	Nantes, Fr	CS6500TEU,	52224,58	29	991,98	
Origin of CFU	Nantes, Fr					
Origin of WB	Nantes, Fr					
Origin of CFL	Nantes, Fr					
Plant for Left Wing	Nantes, Fr	Truck,	8385,47	2	286,84	
Plant for R. Wing	Brighton, UK	CS6500TEU,	46321,62	28	1458,09	
Origin of FFL	Nantes, Fr					
Origin of FFU	Nantes, Fr					
Origin of FFB	Nantes, Fr					
Origin of VSM	Laupheim, Ge					
Origin of VSU	Laupheim, Ge					
Origin of VSR	Laupheim, Ge					
Origin of VSF	Laupheim, Ge					
Origin of RWB1	Portsmouth, UK	Truck,	626,82	9	70,46	
Origin of RWB2	Portsmouth, UK	Truck,	598,51	13	97,69	
Origin of RWT	Portsmouth, UK	Truck,	136,47	29	210,95	
Origin of RWF1	Brighton, UK					
Origin of RWF3	Brighton, UK					
Origin of RWF2	Brighton, UK					
Origin of RWS1	Brighton, UK					
Origin of RWS2	Brighton, UK					
Origin of RWS3	Brighton, UK					
Origin of LWB1	Saint-Nazaire, Fr	Truck,	569,01	9	67,61	
Origin of LWB2	Saint-Nazaire, Fr	Truck,	556,40	13	95,65	
Origin of LWF1	Bristol, UK	BCG_AB,	7116,56	29	1319,17	
Origin of LWF2	Bristol, UK	BCG_AB,	8116,19	29	1319,17	
Origin of LWF3	Bristol, UK	BCG_AB,	8366,68	29	1319,17	
Origin of LWS1	Bristol, UK	BCG_AB,	2743,41	29	1319,17	
Origin of LWS2	Bristol, UK	BCG_AB,	3040,57	29	1319,17	
Origin of LWS3	Brighton, UK	BCG_AB,	3944,63	29	1676,84	
Origin of LWT	Saint-Nazaire, Fr	Truck,	131,56	29	210,01	
Origin of HSRM	Portsmouth, UK.	BCG_AB,Truck,	15490,35	29	2274,17	Bremen, Ge
Origin of HSCB	Portsmouth, UK	BCG_AB,Truck,	9100,07	29	2274,17	Bremen, Ge
Origin of HSRR	Portsmouth, UK	BCG_AB,Truck,	6773,14	29	2274,17	Bremen, Ge
Origin of HSLR	Portsmouth, UK	BCG_AB,Truck,	6773,14	29	2274,17	Bremen, Ge
Origin of HSLM	Bristol, UK	APC,Truck,	21864,00	29	154,95	Bremen, Ge
Origin of HSRL	Portsmouth, UK	BCG_AB,Truck,	2116,60	29	2274,17	Bremen, Ge
Origin of HSLL	Portsmouth, UK	BCG_AB,Truck,	2116,60	29	2274,17	Bremen, Ge
Origin of HSRF	Portsmouth, UK	BCG_AB,Truck,	5041,03	29	2274,17	Bremen, Ge
Origin of HSLF	Portsmouth, UK	BCG_AB,Truck,	5041,04	29	2274,17	Bremen, Ge
TOTAL COST			266166,9513			

Tabla 70: solución obtenida para la distribución logística de la alternativa A5 del CU2.

Figura 169: Modelo anterior

Capítulo 14

Agradecimientos

Finalmente, me gustaría expresar mi agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización del trabajo involucrado en esta tesis doctoral, tanto contribuyendo con sus conocimientos como con su apoyo.

En primer lugar tengo que agradecerle a mi director de tesis el Dr. José Ríos Chueco toda la ayuda que me ha proporcionado, su conocimiento técnico sobre este campo ha sido valiosísimo, así como todos sus consejos y su orientación. Considero, además, que estoy en deuda con él por todo el interés y la dedicación que me ha demostrado, por la confianza que ha depositado en mí y, en definitiva, por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto que ha sido mi doctorado.

Mi director Fernando Mas también merece un agradecimiento especial, primero por todas las contribuciones que ha hecho al trabajo que aquí se presenta. Muchas de las líneas que se han desarrollado parten de ideas originales suyas, fruto de años de experiencia profesional en el campo del montaje en Aeronáutica y de su mentalidad de mejora. Además, ha facilitado la colaboración del departamento con Airbus y la Universidad de Sevilla en proyectos de investigación sobre la Fabricación Asistida por Ordenador, muy interesantes para el desarrollo de la tesis.

Debo agradecer a los compañeros que han estado trabajando en el departamento durante estos años toda la ayuda que me han prestado, su apoyo y simpatía, especialmente a Jorge Casado, Víctor Olmos y Ana Torres.

Le agradezco a la Universidad Politécnica de Madrid y al Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación la formación y los medios que han puesto a mi disposición y sin los que no habría sido posible la realización de este trabajo.

Por último, quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas de mi entorno más cercano. A mi familia directa por su apoyo, tanto económico como emocional, por darme acceso a la educación que he recibido, por su amor incondicional y por estar siempre disponibles cuando les necesitaba. A mis amigos por saber animarme en momentos de estrés o preocupación, por el interés mostrado en mi trabajo y por su comprensión. Y a Joanna Fernández por saber estar ahí, escucharme y por toda la paciencia que ha demostrado.

Creo que sin todos vosotros esto no habría sido posible o, al menos, no habría merecido tanto la pena. Así que, de nuevo, muchas gracias.

Capítulo 15

Bibliografía

- [1] F. Más, PhD, *Desarrollo de un sistema basado en el conocimiento para la definición de líneas de montaje aeronáuticas en la fase conceptual. Aplicación a una aeroestructura aeronáutica*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
- [2] G. Sohlenius, *Concurrent Engineering*, Annals of the CIRP 41, (1992) 645-655.
- [3] S. C-Y. Lu, W. Elmaraghy, G. Schuh, R. Wilhelm, *A scientific foundation of collaborative engineering*, Annals of the CIRP, (2007), 56: 605-634.
- [4] X.G. Ming, J.Q. Yan, X.H. Wang, S.N. Li, W.F. Lu, Q.J. Peng, Y.S. Ma, *Collaborative Process Planning and Manufacturing in Product Life Cycle Management*, Computers in Industry 41 (2008) 154–166
- [5] Pardessus, T., *Concurrent engineering development and practices for aircraft design at Airbus*. Proceedings of the 24th ICAS Conf., Yokohama, Japan; 2004.
- [6] F. Mas., J.L. Menéndez, M. Oliva, J. Ríos; *Collaborative Engineering: an Airbus case study*. The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013, Zaragoza, Spain, June 2013, Procedia Engineering 63 (2013) 336-345
- [7] J. Butterfield, P. Mawhinney, S. Crosby, M. Price, R. Curran, C.G. Armstrong, S. Raghunathan; *An integrated approach to the conceptual development of aircraft structures focusing on manufacturing simulation and cost*. American Institute of Aeronautics and Astronautics 5th Aviation, Technology, Integration and Operations Conference 26-28, Arlington, USA, September 2005.
- [8] J.L. Menéndez, F. Mas, J. Servan, R. Arista, J. Ríos, *Implementation of the iDMU for an aerostructure industrialization in Airbus*. Procedia Engineering 63 (2013) 327 – 335.
- [9] F. Mas, J. Ríos, J.L. Menéndez, J.C. Hernández; *Information Model for Assembly Line Design at Conceptual Phase*. 3rd Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC'09, Alcoy, Spain, June 2009.
- [10] B. Anselmetti, B. Fricero; *Aid tool for the design of process and aircraft assembly lines*. Aerospace Science and Technology 23, Issue 1, (2012) 387-398
- [11] Han M. Shih, *Migrating product structure bill of materials Excel files to STEP PDM implementation*. International Journal of Information Management 34 (2014) 489–516
- [12] Michael Hopf, Jivka Ovtcharova, *Integration of virtualized environments in PDM systems for embedded software product development*. Procedia CIRP 11 (2013) 346 – 351.
- [13] Namchul Do, *Application of OLAP to a PDM database for interactive performance evaluation of in-progress product development*. Computers in Industry 65 (2014) 636–645.
- [14] L. Uriarte, M. Zatarain, D. Axinte, J. Yagüe-Fabra, S. Ihlenfeldt, J. Eguia, A. Olarra. *Machine Tools For Large Parts*. CIRP Annals-Manufacturing Technology 62 (2013) 731-750.
- [15] J. Ríos¹, F. Mas, J.L. Menéndez, *Aircraft Final Assembly Line Balancing and Workload Smoothing: A Methodological Analysis*. Key Engineering Materials. 502 (2012) 19-24.
- [16] F. Mas, J. Ríos, J.L. Menéndez; *Scenario for Concurrent Conceptual Assembly Line Design: a case study*. 4th Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC'11, Cádiz, Spain, September 2011.
- [17] A. Gómez, F. Mas, J. L. Menéndez, J. Ríos, *A Knowledge Based Application For Industrialization Design*. The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC'13, Zaragoza, Spain, June 2013; Procedia Engineering 63 (2013) 318-326.

- [18]C.B Chapman, M. Pinfold; *Design engineering—a need to rethink the solution using knowledge based engineering*. Knowledge-Based Systems 12 (1999) 257-267.
- [19]S. K. Chandrasegaran, K. Ramanian, R. D. Sriram, I. Horváth, A. Bernard, R. F. Harik, W. Gaoa, *The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems*. Computer-Aided Design 45 (2013) 204-228.
- [20]A. Kahn, A. J. Day; *A knowledge based design methodology for manufacturing assembly lines*. Computers & Industry Engineering 41 (2002) 441-467.
- [21]S.J. Hu, J. Ko, L. Weyand, H.A. Elmaraghy, T.K. Lien, Y. Koren, H. Bley, G. Chryssolouris, N. Nasr, M. Shpitalni; *Assembly system design and operations for product variety*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 60 (2011) 715-733.
- [22]O. Battaïa, A. Dolgui, *A taxonomy of Line Balancing problems and their solution approaches*. International journal of Production Economics 142(2013)259-277.
- [23]M. Amen, *Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds*. European Journal of Operational Research 168 (2006) 747-770.
- [24]X.F. Zha, H. Du, Y.E. Lim; *Knowledge intensive Petri Net framework for concurrent intelligent design of automatic assembly systems*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 17 (2001) 379-398.
- [25]B. Rekiek, A. Dolgui, A. Delchambre, A. Bratcu; *State of art of optimization methods for assembly line design*. Annual Reviews in Control 26 (2002) 163-174.
- [26]F.Dèmoly, X.-T. Yan, B. Eynard, L. Rivest, S. Gomes, *An assembly oriented design framework for product structure engineering and assembly sequence planning*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 27(2011)33-46.
- [27]C. Morato, K. N. Kaipa, S. K. Gupta, *Improving assembly precedence constraint generation by utilizing motion planning and part interaction clusters*. Computer-Aided Design 45 (2013) 1349-1364.
- [28]K.-I Huang, T.-H. Wu, *Computer Aided Process planning for Robotic Assembly*. 17th International Conference on Computers and Industrial Engineering. Computers & Industrial Engineering. 29, Issues 1–4, (1995), 653-657.
- [29]E. Westkamper, K. Feldmann, G. Reinhart, G. Seliger, *Integrated Development of Assembly and Disassembly*. Annals of the CIRP 48 (1999) 557-565.
- [30]F. Dèmoly, O. Dutartre, X.-T. Yan, B. Eynard, D. Kiritsis, S. Gomes. *Product relationships management enabler for concurrent engineering and product lifecycle management*. Computers in Industry 64 (2013) 833-848.
- [31]N.W. Bowland, J.X. Gao, R. Sharma, *A PDM- and CAD-integrated assembly modelling environment for manufacturing planning*. Journal of Materials Processing Technology 138 (2003) 82-88.
- [32]C.R.Boerl, P.Pedrazzoli, M.Saccol, R.Rinaldi, G.De Pascale, A.Avai, *Integrated Computer Aided Design for Assembly System*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 50, Issue 1 (2001) 17-20.
- [33]Q. Yang, D.L. Wuc, H.M. Zhu, J.S. Bao c, Z.H. Wei a, *Assembly operation process planning by mapping a virtual assembly simulation to real operation*. Computers in Industry 64 (2013) 869-879.
- [34]F. Cay, C. Chassapis, *An IT view on perspectives of computer aided process planning research*. Computers in Industry 34 (1997) 307-337.
- [35]A. Kampker, P. Burggra, C. Wesch-Potente, G. Petersohn, M. Krunke, *Life cycle oriented evaluation of flexibility in investment decisions for automated assembly systems*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 6 (2013) 274-280.
- [36]M. R. Garey, D. S. Johnson, *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. Books LLC, Wiki Series, ISBN 13: 9781155436838, 2011 (Freeman, San Francisco, CA, 1979).
- [37]C. H. Papadimitriou. *Computational Complexity*. Encyclopedia of Computer Science 4 (2003) 260-265.

- [38]M. Zlochin, M. Birattari, N. Meuleau, M. Dorigo, *Model-based search for combinatorial optimization: A critical survey*, Annals of Operations Research, 131 (2004) 373-395.
- [39]R. Bellman, *Dynamic Programming and Lagrange Multipliers*, Band Corporation, Santa Monica, USA, August 1956.
- [40]M. Dorigo, T. Stützle, *Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances*, IRIDIA – Technical Report Series: TR/IRIDIA/2009-013 (2009).
- [41]M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colorni, *Ant system: optimization by a colony of cooperating agents*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics26, Issue 1 (1996) 29-41.
- [42]M. Dorigo, *Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem*, TR/IRIDIA/1996 Université Libre de Bruxelles 3 (1996).
- [43]Z.C.S.S. Hlaing, M.A. Khine, *An Ant Colony Optimization Algorithm for solving Traveling Salesman Problem*, 2011 International Conference on Information Communication and Management, IPCSIT.16 Singapore, 2011.
- [44]H.I. Calvete, C. Galé, M.I. Oliveros, *Bilevel Model for Production-Distribution Planning solved by using Ant Colony Optimization*,Computers &OperationsResearch38(2011) 320-327.
- [45]J. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, H.Oxford, England: U Michigan Press. (1975).
- [46]T. Saenphon, S. Phimoltares, C. Lursinsap, *Combining New Fast Opposite Gradient Search with Ant Colony Optimization for solving Traveling Salesman Problem*, Engineering ApplicationsofArtificial Intelligence35(2014)324–334.
- [47]C.J. Liao, Y.L. Tsai, C.W. Chao, *An Ant Colony Optimization Algorithm for Setup Coordination in a Two-Stage Production System*, Applied Soft Computing 11 (2011) 4521–4529.
- [48]Beckers, R., Deneubourg, J.L. and Goss, S., 1992, *Trails and U-turns in the selection of the shortest path by the ant Lasius niger*. Journal of Theoretical Biology, 159, 397–415.
- [49]M. Salari, M. Reihaneh, M.S. Sabbagh, *Combining Ant Colony Optimization Algorithm and Dynamic Programming Technique for solving the Covering Salesman Problem*, Computers & Industrial Engineering 83 (2015) 244–251.
- [50]J. Wang, X. Fan, C. Zhang, S. Wan, *A graph-Based Ant Colony Optimization Approach for Integrated Process Planning and Scheduling*.Chinese Journal of Chemical Engineering 22 (2014) 748–753.
- [51]B. Baud-Lavigne, B. Agard, B. Penz,*Mutual Impacts of Product Standardization and Supply Chain Design*. International journal of ProductionEconomics135(2012)50–60.
- [52]N. Manavizadeh, L. Tavakoli, M. Rabbani, F. Jolai, *A multi-objective mixed-model assembly line sequencing problem in order to minimize total costs in a Make-To-Order environment, considering order priority*. Journal of Manufacturing Systems 32 (2013) 124– 137.
- [53]D. Duvivier, N.Meskens, M.Ahues, *A fast Multi-criteria Decision Making Tool for Industrial Scheudulling Problems*. International journal of ProductionEconomics145(2013)753–760.
- [54]A. Prakash, S.G. Deshmukh,*A multi-criteria customer allocation problem in supply chain environment: An artificial immune system with fuzzy logic controller based approach*. Expert Systems with Applications 38 (2011) 3199-3208.
- [55]Z.E. Tang, M. Goetschalck, L. McGinnisb, *Modeling-based Design of Strategic Supply Chain Networks for Aircraft Manufacturing*. Procedia Computer Science 16 (2013) 611-620.
- [56]L. A. Moncayo-Martínez, G. Recio, *Bi-criterion optimisation for configuring an assembly supply chain using Pareto ant colony meta-heuristic*. Journal of Manufacturing Systems 33, Issue 1 (2014) 188–195.
- [57]D. Kumar, J. Singh, O.P. Singh,Seema, *A fuzzy logic based decision support system for evaluation of suppliers in supply chain management practices*. Mathematical and Computer Modelling 58 (2013) 1679-1695.
- [58]G.M. D. Ganga, L.C. Ribeiro, *A fuzzylogic approach to supply chain performance management*. Int. J. Production Economics 134 (2011) 177-187.

- [59]M. Dorigo, L.M. Gambardella, *Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, volume 1, número 1, pages 53-66, 1997.
- [60]C. Blum, *Ant colony optimization: Introduction and recent trends*. Physics of Life Reviews 2 (2005) 353–373.
- [61]H. Wanga, Y. Ronga, D. Xiang, *Mechanical assembly planning using ant colony optimization*. Computer-Aided Design 47 (2014) 59–71.
- [62]A. R. Nia, M. H. Far, S. T. A. Niaki, *A Fuzzy Vendor Managed Inventory of Multi-Item Economic Order Quantity Model under Shortage: an Ant Colony Optimization Algorithm*, Int. J. Production Economics 155 (2014) 259–271.
- [63]B.-Y. Cheng, J. Y.-T. Leung, K. Li, *Integrated Scheduling of Production and Distribution to Minimize Total Cost Using an Improved Ant Colony Optimization Method*, Computers & Industrial Engineering 83 (2015) 217–225.
- [64]E. Esposito, R. Passaro. *Material requirement planning and the supply chain at Alenia Aircraft*, European Journal of Purchasing & Supply Management. 3, Issue 1, (1997). 43-51.
- [65]B. H. Gebreslassie, U.H. Diwekar, *Efficient ant colony optimization for computer aided molecular design: Case study solvent selection problem*, Computers and Chemical Engineering 78 (2015) 1–9.
- [66]R. F. Tavares, M. Godinho, *An Ant colony optimization approach to a permutational flowshop scheduling problem with outsourcing allowed*, Computers & Operations Research 38 (2011) 1286–1293.
- [67]S.E. Kesen, M. D. Toksari, Z. Güngör, e. Guner, *Analysing the behaviours of virtual cells and traditional manufacturing systems: Ant Colony Optimization-based meta models*, Computers & Operations Research 36 (2009) 2275–2285.
- [68]C. Guo, Z. Jiang, H. Zhang, N. Li, *Decomposition based classified ant colony optimization algorithm for scheduling semiconductor wafer fabrication system*. Computers & Industrial Engineering 62 (2012) 141-151.
- [69]C. W. Leung, T. N. Wong, K. L. Mak, R. Y. K. Fung, *Integrated process planning and scheduling by an agent-based ant colony optimization*, Computers & Industrial Engineering 59 (2010) 166-180.
- [70]C.-Y. Cheng, Y.-Y. Chen, T.-L. Chen, J. J.-W. Yoo, *Using a hybrid approach based on the particle swarm optimization and ant colony optimization to solve a joint order batching and picker routing problem*, Int. J. Production Economics (2015) Press version, doi: 10.1016.
- [71]L. A. Zadeh, *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – I & II*. Information Sciences 8, (1975) 199-249.
- [72]L. A. Zadeh, *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – III*. Information Sciences 9 (1976) 43-80.
- [73]R. Reyeró, C.F. Nicolás, *Sistemas de control basados en lógica borrosa: “Fuzzy control”*. Omron Electronics (Ikerlan), ISBN 13: 9788492032624, 1995.
- [74]N. García-Díaz, C. López-Martín, A. Chavoya, *A comparative study of two Fuzzy Logic models for software development effort estimation*, Procedia Technology 7 (2013) 305-314.
- [75]E.U. Olugu, K.Y. Wong, *An expert Fuzzy Rule-based system for closed loop supply chain performance assessment in the automotive industry*, Expert Systems with Applications 39 (2012) 375-384.
- [76]A. Azadegan, *Fuzzy Logic in manufacturing: a review of literature and a specialized application*, Int. J. Production Economics 132 (2011) 258-270.
- [77]K. Abd, K. Abhary, R. Marian, *Efficient schedule rule for Robotic Flexible Assembly Cells based on Fuzzy approach*, Procedia CIRP 3 (2012) 483-488.
- [78]A. Mariajayaprakash, *Optimization of process parameters through Fuzzy Logic and Genetic Algorithm-a case study in a process industry*, Applied Soft Computing 30 (2015) 94-103.

- [79]T. Korol, *A Fuzzy logic model for forecasting exchange rates*, Knowledge-Based Systems 67 (2014) 49-60.
- [80]F. Gagliardi, *Evaluation of sustainability of a city through Fuzzy logic*, Energy 32 (2007) 795-802.
- [81]S. Ozcul, *Fuzzy Logic based inelastic displacement ratios of degrading RC structures*, Engineering Structures 75 (2014) 590-603.
- [82]M.Wulan, *A Fuzzy Logic based system for risk analysis and evaluation within enterprise collaborations*, Computers in Industry 63 (2012) 739-748.
- [83]R.H. Shuford Jr., *Activity-Based Costing and Traditional Cost Allocation Structures*. Cost Estimator's Reference Manual, Wiley-Interscience, Chapter 2 (1995) 41-94.
- [84]E. J. Blocher, K. H. Chen, G. Cokins, T. W. Lin, *Activity-Based Costing and Management*. Cost management: A Strategic Emphasis, Mcgraw-Hill, 3rd Edition, Part One, Chapter 5 (1999) 136-160.
- [85]R. S. Kaplan, R. Cooper, *Activity-Based Costing: Introduction*. Cost and Effect: Using Integrated Cost Systems to Drive Profitability and Performance, Harvard business School Press, Boston, Massachusetts (1998) 79-110.
- [86]F. Hürlimann, R. Kelm, M. Dugas, K. Oltmann, G. Kress, *Mass estimation of transport aircraft wingbox structures with a CAD/CAE-based multidisciplinary process*. Aerospace Science and Technology 15 (2011) 323-333.
- [87]Burt DN, Doyle MF , *The American Keiretsu: A Strategic Weapon for Global Competitiveness*, Business One. Homewood IL: Irwin(1993).
- [88]R.Curran, S. Raghunathan, M. Price, *Review of the aerospace engineering cost modeling: the genetic causal approach*, Progress in Aerospace Sciences 40 (2004) 487-534.
- [89]S.S.A. Willaert, R. de Graaf, S. Minderhoud, *Collaborative Engineering: a case study of Concurrent Engineering in a wider context*, J. Eng. Technol. Manage. 15 (1998) 87-109
- [90]J.L. Menéndez, F. Más, J. Serván, J. Ríos, *Virtual Verification of an Aircraft Final Assembly Line Industrialization:An Industrial Case*, Key Engineering Materials Vol. 502 (2012) 139-144.
- [91]C. Eden, T. Williams, F. Ackermann, *Dismantling the learning curve: the role of disruption on the planning of development projects*, International Journal of Project Management 16Issue 3(1998) 131-138.
- [92]T. L. Smunt , C. A. Watts, *Improving operations planning with learning curves: overcoming the pitfalls of 'messy' shop floor data*,
- [93]M. J. Anzanello, F. S. Fogliatto, *Learning curve models and applications: literature reviews and research directions*, Journal of Operations Management 21 (2003) 93-107.
- [94]M. Y. Jaber, A. L. Guiffrida *Learning curves for imperfect production processes with reworks and process restoration interruptions*, European Journal of Operational Research 189 (2008) 93-104.
- [95]J. B. Morrison, *Putting the learning curve in context*, Journal of Business Research 61 (2008) 1182-1190.
- [96]G. Floretti, *The organizational learning curve*, European Journal of Operational Research 177 (2007) 1375-1384.
- [97]M. Kashkoush, H. Elmaraghy, *Knowledge-based model for constructing master assembly sequence*, Journal of Manufacturing Systems 34 (2015) 43-52.
- [98]O. Cizak, *Computer Aided determination of the assembly sequence of machine parts and sets*, Advances in Engineering Software 48 (2012) 17-26
- [99]S.-T. Yee, J. A. Ventura, *A Petri Net Model to Determine Optimal Assembly Sequences with Assembly Operation Constraints*, Journal of Manufacturing Systems 18 (1999) 203-213.
- [100] K. Kurashige, Y. Yoshinari, S. Miyazaki, Y. Kameyama, *Sequencing method for products in consideration of assembly time*, International Journal of Production Economics 61 (1999) 565-573.

- [101] T.W. Liao, X.-W. Wu, S.-Q. Zheng, S.-Q. Li, *A computer-aided aircraft frame assembly planner*, Computers in Industry 27 (1995) 259-271.
- [102] A. Salmi, P. David, E. Blanco, J.D. Summers, *Assembly Modelling and Time estimating during the early phase of Assembly Systems Design*, IFAC-PapersOnLine 48-3 (2015) 081-087.
- [103] I. Klein, P. Jonsson, C. Bäckström, *Efficient planning for a miniature assembly line*, Artificial Intelligence in Engineering 13 (1999) 69-81.
- [104] Y.N. Sotskov, A. Dolgui, T.-C. Lai, A. Zatsiupa, *Enumerations and stability analysis of feasible and optimal line balances for simple assembly lines*, Computers & Industrial Engineering (2015), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2015.08.018>.
- [105] M.H. Alavidoost, M. Tarimoradi, M.H.F. Zarandi, *Fuzzy adaptive genetic algorithm for multi-objective assembly line balancing problems*, Applied Soft Computing 34 (2015) 655-677.
- [106] M. Gen, Y. Tsujimura, Y. Li, *Fuzzy Assembly Line Balancing Using Genetic Algorithms*, Computers and Industrial Engineering 31-3/4 (1996) 631-634.
- [107] R. Ramezani, A. Ezzatpanah, *Modeling and solving multi-objective mixed-model assembly line balancing and worker assignment problem*, Computers and Industrial Engineering 87 (2015) 74-80.
- [108] S. Motavalli and A.-U. Islam, *Multi-Criteria Assembly Sequencing*, Computers and Industrial Engineering 32-4 (1997) 743-751.
- [109] K. Nakade, *On Periodicity of Cycle Time of a U-shaped Line in Chase Mode*, IFAC-PapersOnLine 48-3 (2015) 2015–2020.
- [110] T.L. de Fazio, D.E. Whitney, *Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences*, IEEE Journal of Robotics and Automation, 3-6 (1987) 640-658.