UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

PROGRAMA DE DOCTORADO: TECNOLOGÍA AGROAMBIENTAL

TESIS DOCTORAL:

**ALGORITMOS DE DECISIÓN PARA
PRIORIZAR LAS ACCIONES DE
RESTAURACIÓN EN EL MANTENIMIENTO
DE REDES**

AUTOR:

MARTÍN JAVIER ALARCÓN MONDÉJAR

Ingeniero de Telecomunicación

DIRECTORES:

JUAN BAUTISTA GRAU OLIVÉ

Doctor Ingeniero Agrónomo

DIEGO ANDINA DE LA FUENTE

Doctor Ingeniero de Telecomunicación

Madrid. Enero 2016

RESUMEN:

En la actualidad, cualquier compañía de telecomunicaciones que posea su propia red debe afrontar el problema del mantenimiento de la misma. Ofrecer un mínimo de calidad de servicio a sus clientes debe ser uno de sus objetivos principales. Esta calidad debe mantenerse aunque ocurran incidencias en la red.

El presente trabajo pretende resolver el problema de priorizar el orden en que se restauran los cables, caminos y circuitos, dañados por una incidencia, dentro de una red troncal de transporte perteneciente a una operadora de telecomunicaciones.

Tras un planteamiento detallado del problema y de todos los factores que influirán en la toma de decisión, en primer lugar se acomete una solución basada en Métodos Multicriterio Discretos, concretamente con el uso de ELECTRE I y AHP. A continuación se realiza una propuesta de solución basada en Redes Neuronales (con dos aproximaciones diferentes al problema). Por último se utiliza un método basado en la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), adaptado a un problema de permutación de enteros (ordenación), y con una forma particular de evaluar la mejor posición global del enjambre.

Complementariamente se realiza una exposición de lo que es una empresa Operadora de telecomunicaciones, de sus departamentos y procesos internos, de los servicios que ofrece, de las redes sobre las que se soportan, y de los puntos clave a tener en cuenta en la implementación de sus sistemas informáticos de gestión integral.

PALABRAS CLAVE:

Red de Telecomunicación, Sistemas de Gestión, Teoría de la decisión, Métodos Multicriterio, ELECTRE, AHP, Redes Neuronales, PSO.

ABSTRACT:

Nowadays, any telecommunications company that owns its own network must face the problem of maintaining it (service assurance). Provide a minimum quality of service to its customers must be one of its main objectives. This quality should be maintained although any incidents happen to occur in the network.

This thesis aims to solve the problem of prioritizing the order in which the damaged cables, trails, path and circuits, within a backbone transport network, should be restored.

This work begins with a detailed explanation about network maintenance issues and all the factors that influence decision-making problem. First of all, one solution based on Discrete Multicriteria methods is tried (ELECTRE I and AHP algorithms are used). Also, a solution based on neural networks (with two different approaches to the problem) is analyzed. Finally, this thesis proposes an algorithm based on Particle Swarm Optimization (PSO), adapted to a problem of integers permutation, and a particular way of evaluating the best overall position of the swarm method.

In addition, there is included an exhibition about telecommunications companies, its departments, internal processes, services offered to clients, physical networks, and key points to consider when implementing its integrated management systems.

KEYWORDS:

Telecommunication Networks, Management Systems, Decision Theory, Multicriteria Decision Methods, ELECTRE, AHP, Neural Networks, PSO.

LISTADO DE PUBLICACIONES

Publicaciones en revista con índice de impacto JCR:

Andina D, Torres-Alegre S, Alarcón MJ, Seijas JI, De-Pablos-Alvaro M. “Robustness of Artificial Metaplasticity Learning Algorithm” *Neurocomputing* Edita: Elsevier 3 March 2015, Vol 151-1 pp. 49-54 - . ISSN 0925-2312.. **ISI Journal Citation Reports® Ranking: 2014: 36/123 (T1, Q2).** Computer Science, Artificial Intelligence. **Impact Factor (2014): 2,083.** doi: 10.1016/j.neucom.2014.07.075

Capítulos de libro de prestigio Internacional:

Andina D, Vega-Corona A, Seijas JI and Alarcón MJ. “Application of Neural Networks” *Computational Intelligence for Engineering and Manufacturing*. Springer-Verlag, Alemania, 1ª edición febrero 2007, segunda edición 23 de noviembre 2009. Hardcover, Softcover & Kindle edition 212 págs. ISBN 10: 0387374507, ISBN 13: 9780387374505 (HB), ISBN-13978-0-387-37452-3, 13978-0-387-37452-9 (e-book).

Distribuido en los principales canales de distribución de libros científicos, incluyendo las principales editoriales de venta on-line del mundo (Amazon, Barnes&Noble, AllBookStores, etc.)

Congresos Internacionales Clasificados (CiteSeer.IST, CORE, CSCR, EI Compendex, WoS, DBLP, ZBIMath/CompuServe, IO-Port, ACM Portal, IEEE Xplore, Scopus, INSPEC, CSRC, etc).

J. Sánchez, J.A. Lozano, M. J. Alarcón, V. Postigo. "Achieving interoperability in a multivendor SDH network". Fifth IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management. 1996.

J. Sánchez, J.A. Lozano, M. J. Alarcón, V. Postigo. "Qsn: a Model to the Network-Service Interface". *Proc. Of 1998 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*. Nueva Orleans (E.E.U.U.). Fecha: 20/02/1998.

Andina D, Alarcón MJ. "A Neural Network as Rank Detector", *Proc. of VIII Latin American Congress on Automatic Control and XIII Congress of the Chilean Association on Automatic Control*, Vol I, pp. 201-205, Viña del Mar, Chile, Noviembre 1998.

Alarcón MJ, Torres-Alegre S, Andina D. "Behavior of a Binary Detector based on an ANN Digital Implementation in the presence of SEU Simulations", Publicación invitada en *Proc. of III World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI'99) and 5th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis (ISAS'99)*, Vol 3, pp. 616-619, Orlando, Florida, USA, Julio-Agosto, 1999.

Alarcón, M.J.; Grau, J.B.; Torres, J. "Application of ELECTRE I Method to Restoration Actions in Telecommunication Network Maintenance". *Proc. of 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. ISIE 2007. Vol. I, pp.3430-3434, 4-7. Vigo. Junio 2007.

Alarcón MJ, Zorzano FJ, Jevtić A, Andina D. “Telecommunications Network Planning and Maintenance”, *The 12th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics: WMSCI 2008*, Vol VIII, pp 64-68 . Orlando, USA, junio 2008. ISBN. 1-934272-30-2.

Andina D, Marcano AE, Torres J, Alarcón M. “Testing Artificial Metaplasticity in MLP Applications”. *Proc. of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp 4361-4366. San Antonio, TX, USA 11-14th October 2009. IEEE Catalog Number: . ISBN: . Library of Congress: . Índice EIC: 0,55.

Alarcón, M.J.; Andina, D.; Grau, J.B.; Torres, J., "Service Assurance in Fixed Broadband Access Networks". *49th Federation of Telecommunications Engineers of The European Union (Fitce) Congress* (2010). Santiago de Compostela. September 2010.

Otras publicaciones:

Juan Carlos Viana Infante, Martín J. Alarcón Mondéjar. "*Hacia la gestión integrada de los datos de la planta*". Artículo de la revista Comunicaciones de Telefónica I+D. Clave: A. ISSN: 1130-4693. Volumen: 18. Páginas: 45-53. Fecha: 1/06/2000.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	15
1.1.	Objetivo.....	16
1.2.	Estado del arte.....	18
1.3.	Estructura del documento.....	18
2.	PROBLEMÁTICA DE LOS GRANDES SISTEMAS.....	21
2.1.	Operadora de Telecomunicación	21
2.2.	Descripción de las redes y servicios	21
2.2.1.	Canalizaciones y Planta exterior.....	22
2.2.2.	Red Troncal de Transporte	26
2.2.3.	Red de Acceso.....	28
2.2.4.	Servicios de Telecomunicación	30
2.3.	Procesos de Negocio.....	31
2.4.	Departamentos y procesos internos. Visión Clásica	32
2.4.1.	Diseño y prospección tecnológica	35
2.4.2.	Planificación y Programación de Obras.....	36
2.4.3.	Instalaciones (Creación de Red).....	36
2.4.4.	Provisión	37
2.4.5.	Supervisión	37
2.4.6.	Operación y Mantenimiento	37
2.5.	Procesos internos. Enfoque eTOM	38
2.5.1.	Estrategia y Compromiso.....	41
2.5.2.	Gestión del ciclo de vida de la Infraestructura.....	41
2.5.3.	Gestión del ciclo de vida del Producto.....	41
2.5.4.	Soporte a la Operación y Puesta en marcha.....	42
2.5.5.	Provisión	43
2.5.6.	Mantenimiento.....	44
2.5.7.	Facturación	44
2.6.	Sistemas de Gestión.....	45
2.6.1.	Integración de sistemas	46
2.6.2.	Claves para una integración con éxito.....	47
2.7.	Inventariado de datos	49
2.7.1.	La importancia de los datos	50
2.7.2.	Centralizados / Distribuidos	51
2.7.3.	Replicación de datos.....	54
2.7.4.	Idioma común.....	57
2.7.5.	Identificadores. Traducción de datos	58
2.7.6.	Tablas de “catálogos” o “diccionarios”	60

2.8.	Tiempo de desarrollo.....	62
2.9.	Las decisiones en el entorno empresarial.....	64
2.10.	Aplicación a otros entornos similares.....	65
3.	TEORÍA DE LA DECISIÓN.....	69
3.1.	Decisión Multicriterio Continuo.....	70
3.2.	Decisión Multicriterio Discreto.....	71
3.2.1.	Normalización de valores.....	72
3.2.2.	Asignación de Pesos.....	72
3.2.3.	Panorámica de los métodos de Decisión Multicriterio Discreto.....	73
3.2.4.	Métodos ELECTRE.....	77
3.2.5.	Método ELECTRE I.....	79
3.2.6.	Aspectos clave de ELECTRE I.....	81
3.2.7.	Método AHP.....	82
3.2.8.	Método PROMETHEE.....	83
3.3.	Redes Neuronales Artificiales.....	86
3.3.1.	Composición de una red neuronal.....	87
3.3.2.	Entrenamiento de una red neuronal.....	89
3.4.	Métodos SWARM.....	91
3.4.1.	Optimización por Enjambre de Partículas.....	91
4.	ESTADO DEL ARTE EN LOS PROCESOS DE MANTENIMIENTO.....	97
4.1.	Soluciones adoptadas en las Operadoras.....	97
4.2.	Software de Gestión de Red.....	99
4.2.1.	Productos.....	99
4.2.2.	Elección de un producto comercial.....	104
4.3.	Compañías de servicios de integración.....	105
5.	ALGORITMOS PROPUESTOS PARA LA PRIORIZACIÓN DE ACCIONES DE MANTENIMIENTO.....	107
5.1.	Planteamiento del problema.....	107
5.2.	Objetivo.....	109
5.3.	Información considerada.....	109
5.4.	Aplicación del Método Multicriterio Electre I.....	115
5.4.1.	Criterios.....	115
5.4.2.	Alternativas.....	117
5.4.3.	Cuantificación de los criterios.....	120
5.4.4.	Estrategia de aplicación del Método.....	125
5.4.5.	Ejemplo de aplicación con datos reales.....	126
5.4.6.	Mediciones.....	130
5.4.7.	Conclusiones particulares ELECTRE.....	132
5.5.	Aplicación de método Multicriterio AHP.....	133

5.5.1.	Mediciones	136
5.5.2.	Conclusiones particulares AHP	137
5.6.	Aplicación de métodos basados en Redes Neuronales	137
5.6.1.	Opción A: Las salidas son alternativas de ordenación	138
5.6.2.	Opción B: La salida es el orden de cada circuito.....	143
5.6.3.	Entrenamiento y simulaciones	146
5.6.4.	Influencia del número de redes y sus nodos	149
5.6.5.	Conclusiones particulares del método	156
5.7.	Aplicación de método basado en PSO	157
5.7.1.	Ejecución de las iteraciones paso a paso	161
5.7.2.	Mediciones	171
5.7.3.	Conclusiones particulares	175
6.	COMPARATIVA DE RESULTADOS DE LOS ALGORITMOS USADOS	177
6.1.	Condiciones del entorno de pruebas	177
6.2.	Comparativa de algoritmos con las mismas alternativas	180
6.3.	Comparativa por criterios aislados	183
6.4.	Comparativa conjunta. Aplicación de PROMETHEE	188
6.4.1.	Establecimiento de umbrales de preferencia por cada criterio.....	188
6.4.2.	Pesos de los criterios	191
6.4.3.	Valores de los flujos obtenidos	191
6.4.4.	Resultados finales de la comparación de los métodos.....	195
7.	RESUMEN Y CONCLUSIONES	201
7.1.	Una decisión, múltiples opciones	201
7.2.	Explicación de los resultados obtenidos y sus limitaciones	202
7.2.1.	Criterios que gobiernan la evaluación de las soluciones.....	203
7.2.2.	PSO, la mejor opción ensayada	204
7.3.	Líneas futuras de trabajo	206
7.4.	Principales aportaciones realizadas	207
8.	GLOSARIO.....	209
9.	REFERENCIAS	213

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Importancia de la priorización en la restauración de un circuito	17
Figura 2: Componentes Básicos de una Red	21
Figura 3: Estructura típica de una Red de Telecomunicación	22
Figura 4: Antena para comunicaciones por satélite	23
Figura 5: Canalizaciones en la planta exterior	24
Figura 6: Cables submarinos en el océano Atlántico	25
Figura 7: Red de NTT en el océano Pacífico	25
Figura 8: Reparación de un cable submarino.....	26
Figura 9: Caminos sobre un medio físico	26
Figura 10: Jerarquías y Multiplexación	27
Figura 11: Tecnologías de Red de Transporte.....	27
Figura 12: Red de acceso de bucles de abonado de cobre	29
Figura 13: Red de acceso de banda ancha	29
Figura 14: Red de acceso GPON.....	30
Figura 15: Áreas Funcionales de gestión (visión clásica)	33
Figura 16: Pirámide de los niveles de gestión (visión clásica).....	34
Figura 17: Niveles de gestión. Relación agente-gestor	34
Figura 18: Diseño y prospección tecnológica.....	35
Figura 19: eTOM nivel 1	39
Figura 20: eTOM nivel 2. Estrategia-Infraestructura-Productos	40
Figura 21: eTOM nivel 2. Operaciones.....	43
Figura 22: TAM. Mapa de Aplicaciones de Telecomunicación.....	46
Figura 23: Datos comunes centralizados	52
Figura 24: Datos comunes distribuidos.....	53
Figura 25: Aparición de un nuevo sistema en un mapa, cada uno con su base de datos.....	55
Figura 26: Replicación de datos pasando de un sistema a otro.....	56
Figura 27: Red de distribución eléctrica.....	66
Figura 28: Paradigma del problema de Decisión Multicriterio Discreto	71
Figura 29: Representación del método AHP	82
Figura 30: Esquema de una Red Neuronal.....	87
Figura 31: Representación del funcionamiento de una neurona	88
Figura 32: Visión espacial de algoritmo PSO	92
Figura 33: Influencias en el movimiento de una partícula en PSO	94
Figura 34: Aspectos relativos a los procesos de mantenimiento.....	97
Figura 35: Condiciones de los servicios en un gráfico 3D.	102

Figura 36: Un ejemplo real de red heterogénea.....	103
Figura 37: Corte de un cable en la red de Transporte	108
Figura 38: Contención entre capas de transporte	114
Figura 39: Pesos relativos de los criterios.....	116
Figura 40: Influencia de la ordenación en el tiempo de restauración de un circuito	123
Figura 41: Tiempo (seg.) de obtención de las 5 alternativas (5 listas). ELECTRE	131
Figura 42: Tiempo (seg.) de cálculo de los criterios para la 5 alternativas. ELECTRE	131
Figura 43: Tiempo total de ejecución (seg.). ELECTRE.....	132
Figura 44: Cálculo de pesos de AHP en PriEst.....	134
Figura 45: Representación en forma de grafo de los pesos de AHP en PriEst.....	135
Figura 46: Evaluación de las alternativa para criterio “Coste Material” con PriEst	136
Figura 47: Tiempo total de ejecución (seg.). AHP.....	137
Figura 48: Entrenamiento de la Red en la Opción A	139
Figura 49: Procedimiento de aplicación de la Opción A	142
Figura 50: Entrenamiento de la Red en la Opción B	144
Figura 51: Procedimiento de aplicación de la Opción B	145
Figura 52: Inicio del Neural Network Toolbox de MATLAB.....	146
Figura 53: Fitting Tool de MATLAB	147
Figura 54: Selección de datos para entrenamiento en la Fitting Tool de MATLAB.....	147
Figura 55: Selección de datos para entrenamiento y para validación de una red neuronal	148
Figura 56: Estadísticas sobre el entrenamiento de una red neuronal	148
Figura 57: Tiempo ejecución (seg), en función de cantidad de Entidades. En Serie.....	150
Figura 58: Tiempo ejecución (seg), en función de cantidad de Entidades. A y B. En Serie.....	152
Figura 59: Tiempo ejecución (seg), en función de cantidad de Entidades. A. En Serie	154
Figura 60: Tiempo ejecución (seg), en función de cantidad de Entidades. B. En Serie.....	154
Figura 61: Tiempo ejecución (seg), en función de cantidad de Entidades. B. En Paralelo.....	155
Figura 62: Aplicación de PSO en espacio unidimensional.....	159
Figura 63: Aplicación de PSO. Corrección de salidas de límites y duplicados.....	164
Figura 64: Tiempo de la Evaluación Global de Posición (seg.) en una iteración de PSO	172
Figura 65: Tiempo Total (seg.) en una iteración de PSO	173
Figura 66: Cantidad de iteraciones en PSO para solución estable.....	174
Figura 67: Tiempo ejecución (seg.) en PSO para solución estable.....	175
Figura 68: Sistema Operativo y Equipo de prueba	178
Figura 69: Banco de pruebas para comparar tiempos de ejecución	179
Figura 70: Banco de pruebas para comparar métodos entre sí	180
Figura 71: Alternativa elegida por cada método a lo largo del banco de pruebas	182
Figura 72: Porcentaje de coincidencias de alternativa elegida por cada método	182

Figura 73: Comparativa por criterio de Coste Material	185
Figura 74: Comparativa por criterio de Coste Humano	186
Figura 75: Comparativa por criterio de Penalizaciones	186
Figura 76: Comparativa por criterio de Cese de Ingresos	187
Figura 77: Comparativa por criterio de Repercusión Mediática	188
Figura 78: Medias del criterio de Coste Material.....	189
Figura 79: Medias del criterio de Coste Humano	189
Figura 80: Medias del criterio de Penalizaciones.....	190
Figura 81: Medias del criterio de Cese de Ingresos	190
Figura 82: Medias del criterio de Repercusión Mediática	191
Figura 83: Cantidad de veces que cada algoritmo fue el mejor.....	196
Figura 84: Tiempos medios de ejecución de cada algoritmo.....	197
Figura 85: Comparativa entre todos los algoritmos, salvo PSO	198
Figura 86: Comparativa entre Alternativas discretas.....	199

1. INTRODUCCIÓN

Las grandes empresas constituyen un mundo complejo. Hoy en día prácticamente todas ellas disponen de sistemas informáticos para diferentes cometidos, pero ocurre que no siempre los sistemas que poseen son los idóneos para un cierto fin.

Un sistema se implanta en una empresa en un momento dado, ante una necesidad o problema que resolver, pero con el transcurso del tiempo, y la aparición de nuevos requisitos, si el sistema no es adecuadamente evolucionado, se queda obsoleto.

Los sistemas también tienen que estar adaptados a las organizaciones que los utilizan. En una gran empresa suele haber muchas secciones o departamentos diferentes, especializados en distintas tareas, y se necesita mucha coordinación entre ellos para que no se produzcan actuaciones duplicadas, o para que no ocurra todo lo contrario, que existan tareas que nadie realiza porque están fuera de sus responsabilidades nominales. Cada organización puede estar utilizando sistemas diferentes, y debe existir una definición precisa de todo el mapa de sistemas existentes, de modo que se garantice la convivencia y colaboración entre todos ellos.

Una de esas tareas, y que constituye el punto principal del presente trabajo, es la relacionada con el mantenimiento de las redes y de los servicios que se prestan sobre dichas redes. Uno de los objetivos principales de cualquier empresa de servicios es ofrecer y mantener unos niveles mínimos de calidad de servicio para sus clientes, y estos niveles deben proporcionarse aunque aparezca cualquier incidencia inesperada que pudiera interrumpir o deteriorar dicha prestación.

Ya sea una empresa de suministro de agua, de gas, de electricidad, una empresa de telecomunicaciones o incluso de transporte ferroviario, entre otras muchas, todas ellas se caracterizan por poseer una “red” propia, que además suele ser el mayor activo de la empresa. En unos casos, esa red (haciendo una descripción de alto nivel) está formada por depósitos, embalses, tuberías y canalizaciones; en otros por cables y equipos eléctricos o electrónicos, y en el caso ferroviario la red estaría compuesta por todas las vías de tren que estén tendidas a lo largo de un territorio.

Si un tren se estropea entre dos poblaciones bloqueando la vía, es necesario desviar el tráfico del resto de trenes (si se puede) por itinerarios alternativos. Si se avería una subestación eléctrica es necesario conectar el suministro de los clientes afectados a otras subestaciones (si es posible) y aumentar en ellas la energía de suministro disponible. Si un embalse se queda sin agua será necesario realizar trasvases desde otros embalses o cuencas fluviales para atender a las poblaciones afectadas. Estos serían ejemplos de acciones de mantenimiento que hay que realizar en las redes para garantizar el servicio a los clientes.

Centrándonos en el caso de una empresa operadora de telecomunicaciones, es sabido que los equipos y sus componentes se estropean, bien por envejecimiento o por otras causas. Igualmente siempre se tiene la necesidad de renovar la planta, instalando nuevos equipos más modernos que sustituyan a los antiguos, o instalando nuevos cables que mejoren la conectividad en la red. Y no olvidemos el caso más típico que genera una actuación de mantenimiento, que es una rotura de instalaciones por causa de una obra civil (cuando una excavadora, haciendo un hoyo, rompe un cable de transmisión) o por causa de un desastre natural (inundaciones, terremotos, etc.) que lamentablemente, hoy en día, cada vez son más frecuentes. Todas estas causas y muchas otras pueden provocar el deterioro de la calidad de servicio que se ofrece a los clientes finales.

Para evitar esto es necesario llevar a cabo la reparación de los elementos afectados, o bien, efectuar actuaciones orientadas a restaurar el servicio que es, en definitiva, el fin último ante una incidencia. Todas estas acciones constituirían el objeto de la tarea de mantenimiento de la red.

El problema del mantenimiento de una red es un problema muy complejo y muy estratégico, tanto que suele justificar la creación, dentro de la empresa, de un departamento especializado en esta tarea, aunque estemos ante una empresa pequeña. Optimizar las decisiones sobre las acciones de mantenimiento que se deben realizar, influirá en el éxito de la resolución de la incidencia, y por tanto en la satisfacción de los clientes finales de los servicios.

1.1. Objetivo

El objetivo de la presente tesis es estudiar, adaptar y aplicar diferentes algoritmos de "Teoría de la Decisión" [42] [43] [44] al problema del mantenimiento de una red de telecomunicación de una compañía Operadora.

Para ser más concretos, esta tesis persigue la elaboración de un algoritmo que ordene, de mayor a menor prioridad, todas las acciones concretas que deben realizarse en el mantenimiento de una red de telecomunicación, ante la aparición de incidencias. El trabajo se centra además en la parte de la red troncal de transporte, descrita en la recomendación G.800 de la ITU-T [6], y en su servicio final principal, que son los circuitos alquilados, descritos en la recomendación M.1015 [21] y M.3208.1 [36]. En función de esa prioridad los trabajadores del departamento de mantenimiento de la operadora realizarán las acciones oportunas para ir recuperando cada una de las entidades afectadas. Una panorámica de las actividades de mantenimiento relativas a esos circuitos se describen en la recomendación M.1060 [24].

Esa priorización debe conseguir una solución de mínimo coste para la compañía operadora, y para poder medir esos costes se definirán aquí una serie de métricas al respecto. En el fondo, una incidencia no sería un problema para una empresa si no le supusiera un coste o una pérdida de ingresos, ya que todos sabemos que el fin último de una empresa es ganar dinero y perpetuarse en el tiempo (para seguir ganando dinero).

Pensemos por ejemplo en una incidencia que provoca un corte de servicio en un conjunto de clientes. Si no se realizara ningún tipo de priorización ni ordenación de las acciones a acometer, sino que directamente el departamento de mantenimiento comenzara a realizar las reparaciones sin realizar ningún estudio previo (por orden de detección del corte, por ejemplo), podríamos encontrarnos que el último de los servicios reparados sea el de una sucursal bancaria muy importante. Es decir, el grupo de mantenimiento habría dedicado los primeros minutos u horas, tras la detección de la incidencia, a ir recuperando el servicio de clientes de menor relevancia, y cuando hubiera llegado el turno de la restauración del servicio a dicha sucursal bancaria podría haber transcurrido una gran cantidad de tiempo.

Lo habitual, en servicios que requieren de una alta disponibilidad, es que cuando un cliente (en nuestro caso la sucursal bancaria) contrata uno de esos servicios, se establecen penalizaciones hacia el prestador del servicio en caso de interrupción del mismo. Y las penalizaciones suelen ser proporcionales al tiempo de indisponibilidad. Si a eso unimos que se tratase de una sucursal perteneciente a una entidad bancaria con miles de sucursales, y por tanto con un gran volumen de negocio con la operadora, las represalias pueden ser enormes.

Figura 1: Importancia de la priorización en la restauración de un circuito

En resumen, podríamos encontrar con que perseguíamos restablecer el servicio de todos los clientes, y al no haber priorizado adecuadamente las tareas, la operadora debe compensar económicamente a la entidad bancaria mucho más dinero que el que supongan los ingresos de todo el resto de contratos de los clientes afectados por la incidencia.

Se podría pensar que este caso era sencillo de resolver, bastaba con haber priorizado primero la restauración de los clientes que tuvieran contratadas mayores penalizaciones por indisponibilidad en sus contratos. Pero la situación en un caso real no es tan simple, influyen muchos factores y hay que tratar de tenerlos todos en cuenta. Atender sólo a un factor en detrimento de otro hará que la ordenación de acciones obtenida no sea la óptima. No sólo influyen las penalizaciones firmadas en los contratos de prestación de servicios, otros factores son por ejemplo:

- Afectación a servicios críticos (policía, emergencias, hospitales, etc.).
- Incomunicaciones de enlaces portadores de otros servicios (Telefonía, Internet, TV).
- Existencia de reclamaciones de los clientes.
- Categorización e importancia de cada cliente.

En definitiva, el presente trabajo busca identificar todos los factores, plantear el problema modelando la inclusión de todos ellos, establecer algoritmos de priorización que reciban como entrada todos esos datos, y ejecutarlos para obtener una solución óptima al problema.

1.2. Estado del arte

Para afrontar los procesos de mantenimiento de su red, las operadoras recurren a implementar *software* a medida, o bien a comprar productos *software* comerciales, y a ayudarse de alguna empresa de integración que le ponga en funcionamiento dicho sistema con las particularidades que la operadora tenga.

Aunque el estado del arte relativo al mantenimiento de una red de transporte se describe en detalle en el apartado “4. ESTADO DEL ARTE EN LOS PROCESOS DE MANTENIMIENTO”, la realidad es que es muy difícil que un producto comercial sin adaptaciones pueda resolver la problemática completa de una operadora.

Sí que existen soluciones de supervisión capaces de detectar alarmas [125] e identificar la causa raíz [136][121] y los servicios afectados [121]. Pero no es fácil encontrar soluciones que vayan más allá, realizando una priorización efectiva de las acciones de reparación, de manera adaptada a las particularidades de una operadora. Evidentemente algunas operadoras podrían disponer de desarrollos a medida para esta tarea, pero esos sistemas no son públicos ya que forman parte de su posicionamiento ante la competencia.

1.3. Estructura del documento

Previamente a los capítulos dedicados al problema de optimización del mantenimiento de una red, la primera parte de este trabajo se centra en una explicación clara y detallada del contexto del problema que se pretende resolver. En esta primera parte se realiza una exposición de lo que es una empresa Operadora de telecomunicaciones, de sus departamentos y procesos internos, de los servicios que ofrece y de las redes sobre las que se soportan. E incluso, esta primera parte va más allá, constituyendo una recopilación de reflexiones sobre la implementación de grandes Sistemas informáticos de Gestión, en las empresas. Esta recopilación es fruto de la experiencia profesional del autor, en este campo, tras muchos años de trabajo con operadoras de varios países, y puede servir de bastante ayuda para cualquiera que pretenda iniciarse en el mundo de los sistemas de gestión.

Así pues, dejando aparte la presente introducción, y el capítulo de la problemática de los grandes sistemas de gestión, el contenido del resto de capítulos es el siguiente:

- Teoría de la decisión. Capítulo dedicado a la revisión teórica de los principales métodos matemáticos en el entorno de la teoría de la decisión, comentando con especial interés los algoritmos utilizados en este trabajo.
- Estado del Arte en los Procesos de Mantenimiento. Revisión de las soluciones particulares y comerciales que existen, relativas al problema del mantenimiento de una red de transporte, perteneciente a una operadora de telecomunicaciones.
- Algoritmos Propuestos para la Priorización de Acciones de Mantenimiento. Aplicación de los algoritmos seleccionados por el autor al problema de priorización de las acciones correctivas de mantenimiento en una red de transporte. Explicación de las particularidades de la aplicación de cada algoritmo. Incluye mediciones de tiempos de ejecución.
- Comparativa de Resultados de los Algoritmos Usados. Análisis conjunto de todas las simulaciones realizadas, con todos los algoritmos, para determinar el que ha conseguido mejores resultados con el banco de datos de prueba disponible.

- Resumen y Conclusiones. Incluyendo las principales aportaciones de este trabajo y las futuras líneas de acción.

2. PROBLEMÁTICA DE LOS GRANDES SISTEMAS

En este capítulo se recoge una exposición de la problemática de los grandes sistemas informáticos que hoy en día hay en casi todas las empresas para gestionar su funcionamiento interno. En concreto, la mayor parte del capítulo se centra en los sistemas de gestión de red pertenecientes a las empresas operadoras de telecomunicación. Por eso, los primeros apartados introducen el contexto en el que se mueven estas empresas, las redes que forman su infraestructura, los servicios que comercializan y los procesos de negocio principales que deben tenerse en cuenta dentro de ellas.

2.1. Operadora de Telecomunicación

Es una compañía que tiene como objetivo proporcionar servicios de telecomunicación a sus clientes. Los clientes pueden ir desde grandes empresas hasta el gran público.

Una compañía de este tipo, lo normal es que posea una red propia de comunicaciones, aunque no es estrictamente necesario, ya que puede proporcionar servicios a clientes usando la infraestructura de otra operadora (reventa de capacidad).

Ejemplos de grandes operadoras a nivel mundial son: Telefónica, AT&T (American Telephone and Telegraph Company), NTT Communications (Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation), Verizon Communications, Deutsche Telekom, Vodafone, British Telecom, France Telecom, TeliaSonera, etc.

2.2. Descripción de las redes y servicios

De forma simple y resumida, podríamos decir que una red de telecomunicaciones se compone de equipos que están interconectados utilizando medios de transmisión (cables físicos o medios inalámbricos).

Figura 2: Componentes Básicos de una Red

Sobre su red de telecomunicación, una compañía Operadora de Telecomunicación ofrece servicios a sus clientes, pero entre esos servicios y la infraestructura física existe una gran cantidad de

protocolos de comunicación estructurados en capas jerárquicas, de manera que unas capas usan los servicios que proporcionan sus capas servidoras, y a su vez ofrecen servicios a sus capas clientes [11] [33].

Aunque hoy en día están en auge los servicios no orientados a conexión (es decir, servicios basados en la conmutación de paquetes [9]) estos servicios se soportan al final sobre otros que sí están orientados a conexión (es decir, orientados al establecimiento de una comunicación directa, en principio, entre dos puntos). O dicho de otro modo, toda red de telecomunicación dispone de una red troncal de transporte que es el corazón de todas las comunicaciones que se soportan en la red [6].

En una red con pocos equipos (digamos unas decenas) podría pensarse en interconectar físicamente los equipos, todos con todos. Pero cuando en la red lo que tenemos son miles de equipos dispersos en un territorio amplio, este esquema es imposible. Esta última es la situación real con la que se encuentra una operadora, y en ese caso, la red se estructura de una forma jerárquica: varios equipos cercanos se interconectan entre sí, y uno o algunos de ellos se interconectan con uno o varios equipos de otro conjunto de equipos interconectados entre sí. Este esquema puede repetirse varias veces: pudiéndose tener agrupaciones locales, provinciales, regionales y llegar a las nacionales. De esta manera se construye una red de transporte.

Figura 3: Estructura típica de una Red de Telecomunicación

2.2.1. Canalizaciones y Planta exterior

Se denomina Planta Exterior, a la infraestructura Telefónica que no se encuentra dentro de una Central Telefónica. Con esta denominación, hacemos referencia a todo tipo de canalizaciones (subterráneas, submarinas), tendidos (en fachada o en postes) urbanos e interurbanos, conexiones

satelitales, enlaces de microondas, red (cableado) y equipos intermedios (regeneradores, amplificadores, etc.), que sirven tanto para la interconexión de Centrales Telefónicas, como para la distribución a los clientes.

Por el contrario, se denomina Planta Interna, a la infraestructura existente en una Central Telefónica. Aquí distinguiremos entre Conmutación, Transmisión, Radio, TV, etc.

Los límites entre ambas Plantas se encuentran en unos grandes armarios de interconexiones que se denominan repartidores. Todos los cables se encuentran conectados a un repartidor y, mediante puentes, se conectan a los diferentes equipos.

Dependiendo del tipo de cable, éste terminará en un tipo de repartidor u otro. Por ejemplo, los cables de pares terminan en un repartidor de pares, los de F.O. en un repartidor óptico, etc.

Figura 4: Antena para comunicaciones por satélite

Las canalizaciones constituyen el nivel básico de la infraestructura física de una red de telecomunicación. Son los conductos físicos en el interior de los cuales se tienden los cables. Puesto que las canalizaciones suelen ser subterráneas, para facilitar la reparación de los cables, las canalizaciones suelen tener, separadas por cierta distancia, cámaras de registro que posibilitan el acceso a los cables. Evidentemente, quedan fuera de esta clasificación los radioenlaces o enlaces satelitales pues al ser comunicación por ondas de radio no usan ningún cable físico como soporte. Los procedimientos de mantenimiento que aplican a los enlaces de este tipo se describen en la recomendación M.1130 [22].

Es decir, los cables de interconexión comienzan y terminan en repartidores, entre una central y otra, usando para ese trayecto el interior de canalizaciones, con cámaras de registros intermedias.

Los repartidores añaden flexibilidad a la red y permiten conectar fibras entre cables o entre un cable y un equipo, sin necesidad de tender nuevos cables.

Si observamos un cable, estará formado por distintas secciones empalmadas entre sí. Los empalmes se realizan en las cámaras de registro y son necesarios, ya que una bobina de cable tiene una longitud fija, que no tiene por qué corresponder con la distancia entre las dos centrales a conectar.

En caso de rotura de cable (o ampliaciones, etc.), se procede al tendido de una nueva sección entre dos cámaras de registro y se sustituye la sección antigua por la nueva, abriendo los empalmes existentes y haciendo unos nuevos.

Figura 5: Canalizaciones en la planta exterior

Como es fácil intuir, solucionar un problema en un cable subterráneo es algo complicado y costoso. Es necesario identificar el punto exacto del corte (existen sistemas de gestión que posibilitan la geolocalización de los problemas, por mediciones de presión dentro de los cables), y luego es necesario una obra civil para desenterrar el cable y volver a dejarlo todo como estaba.

Pero si solucionar el corte de un cable subterráneo es complejo mucho más lo es un corte en un cable submarino. Existen en todos los océanos multitud de cables submarinos que soportan la mayoría del tráfico de comunicaciones entre todos los continentes (mucho más que las comunicaciones por satélite, ya que tienen mucho mayor ancho de banda). Estos cables descansan sobre el lecho marino, normalmente a gran profundidad. Y aunque están reforzados con materiales resistentes a grandes esfuerzos, tal y como se describe en la G.971 [14], pueden romperse (por ejemplo por la acción de volcanes, terremotos, o por la acción de la actividad humana).

Figura 6: Cables submarinos en el océano Atlántico

Figura 7: Red de NTT en el océano Pacífico

La reparación de un cable submarino lleva su tiempo. Hasta que se consiga reparar será necesario reencaminar el tráfico por otros medios, dando prioridad a los tráficos que sean más críticos o estratégicos (precisamente ese es el objetivo del presente trabajo de tesis).

Para llevar a cabo la reparación será necesario enviar un barco especial (buque cablero) que localice la rotura y consiga realizar el empalme entre los dos extremos.

Figura 8: Reparación de un cable submarino

2.2.2. Red Troncal de Transporte

La Red Troncal de Transporte está constituida por los enlaces de más alta capacidad (más alta velocidad binaria), que unen los grandes centros que concentran el mayor tráfico de la red.

En el despliegue de una red de telecomunicación en un país, lo recomendado es desplegar una red troncal, que una, mediante enlaces punto a punto, las ciudades más importantes (pues entre ellas se generará la mayor cantidad de comunicaciones). Físicamente estos enlaces se componen de un medio físico (cable o radioenlaces) con equipos de transmisión en sus extremos. A la comunicación lógica que se establece entre esos extremos se le denomina “camino” (*path*) o “trayecto” (*trail*).

Figura 9: Caminos sobre un medio físico

A partir de su infraestructura física, la red se construye de forma lógica definiendo caminos de diferente velocidad, unos clientes de otros, de manera que se consiga una “capilaridad” suficiente para proporcionar servicios a todos los usuarios (clientes finales) que lo soliciten. Así, por un medio físico (cable o radioenlace) puede establecerse la comunicación de varios caminos de nivel físico, en paralelo, entre dos nodos extremos. Sobre estos caminos, que forman la base de la jerarquía, se despliegan otros caminos, en una capa cliente de la anterior, que van ocupando la capacidad que

ofrece la capa servidora. Esto se realiza mediante la operación básica que realizan los equipos de una red de transporte que es la Multiplexación, tal y como se describe en G.921 [13].

En la capa “más cliente” de esta jerarquía se sitúan un tipo especial de “caminos” a los que se denomina comúnmente “circuitos”, pudiéndose entender que son aquellos que se utilizan para prestar un servicio final, directamente contratable por un usuario (cliente) de la operadora, y al cual la operadora cobrará por ofrecer dicho servicio.

Figura 10: Jerarquías y Multiplexación

Las tecnologías actuales que se usan en las redes de transporte son principalmente:

- Jerarquía Digital Plesiócrona (JDP, *PDH*), descrita en G.705 [2]. Con velocidades de hasta 565 Mbit/s.
- Jerarquía Digital Síncrona (JDS, *SDH*), descrita en G.780/Y.1351 [3] y G.783 [4]. Con velocidades de hasta 40 Gbit/s.
- Multiplexación por división en longitud de onda (*WDM*, *DWDM*), descrita en G.872 [12]. Con velocidades superiores a las anteriores. Para una visión global de todas las velocidades posibles hay que consultar la G.702 [1].

Es típico el despliegue en anillos que cubren una zona geográfica y aseguran redundancia física de trayectos entre dos puntos.

Figura 11: Tecnologías de Red de Transporte

En todas estas tecnologías, la comunicación entre dos puntos se basa en el establecimiento de un “camino” con una serie de características, entre las cuales las principales son:

- El punto de origen
- El punto de destino
- Su velocidad (valores posibles descritos en G.702 [1]).
- La relación con sus caminos servidores
- La relación con sus caminos clientes

Las relaciones jerárquicas de contención entre caminos servidores y clientes serán uno de los factores fundamentales que se tendrán en cuenta durante la aplicación de los métodos de restauración. Mediante técnicas de análisis de causa raíz, como las descritas en la M.2140 [26], o mediante alarmas directamente recibidas por los sistemas de supervisión se puede averiguar que el problema de un conjunto de caminos se encuentra en su camino servidor [5]. En ese caso, aplicar una única acción correctiva sobre dicho caminos conseguirá restaurar el servicio en todos los caminos clientes.

2.2.3. Red de Acceso

La red de acceso es la que proporciona la suficiente capilaridad para poder llegar a todos los domicilios de los clientes. En los servicios de telefonía móvil podríamos decir que prácticamente no existe red de acceso puesto que las antenas de proporcionan servicio a cada celda sin necesidad de más cableado.

La red de acceso tradicional es la compuesta por los llamados bucles de abonado. Pares de cables de cobre que van desde la última central de conmutación hacia todos y cada uno de los hogares a los que da cobertura. En muchos países el tendido de estos pares es completamente aéreo (no se usan canalizaciones enterradas), eso favorece el acceso en caso de rotura pero también aumenta la probabilidad de que sean dañados por algo. Un adecuado rotulado de los cables y de sus repartidores facilitará su localización para que un operador de mantenimiento pueda repararlos en caso de fallo.

Figura 12: Red de acceso de bucles de abonado de cobre

Aprovechando la infraestructura de acceso de cobre, inicialmente pensada sólo para los servicios de telefonía fija, se fue desarrollando la red de acceso de banda ancha, la cual posibilita los servicios de conexión por internet. Mediante la colocación de elementos multiplexores del tráfico de internet (DSLAMs) conectados a los bucles de abonado se consigue concentrar el tráfico de miles de clientes. Estos DSLAMs se conectan mediante conmutadores hasta concentrar todo el tráfico de decenas de miles de abonados en los Agregadores de Internet (ERX).

Figura 13: Red de acceso de banda ancha

La tecnología de los DSLAMs ha permitido implementar diferentes modalidades de acceso, desde el ADSL inicial [18], hasta el HDSL [17], pasando por el VDSL [19].

La evolución posterior, posibilitada por el abaratamiento de la tecnología óptica, ha sido la sustitución de los bucles de cobre por cables de fibra óptica, formando una estructura en árbol denominada Red Óptica Pasiva (GPON), cuyas características principales se describen en la G.984.1 [16].

Figura 14: Red de acceso GPON

La raíz del árbol es cada equipo OLT situado en los mismos edificios de las centrales de conmutación, así se explica en la G.983.1 [15].

2.2.4. Servicios de Telecomunicación

Los servicios típicos que normalmente se ofrecen para el gran público residencial son:

- Telefonía fija analógica (y últimamente también telefonía fija por acceso IP).
- Telefonía móvil
- Acceso a internet de banda ancha
- Televisión por IP (IPTV). Aprovechando los accesos de banda ancha.

Los principales servicios que las compañías operadoras de telecomunicación ofrecen a las grandes empresas, además de los anteriores, son:

- Circuitos alquilados. Circuitos punto a punto con tecnología de conmutación de circuitos y calidad garantizada. En la M.562 [20] se describen los tipos existentes.
- Conectividad por IP. Redes privadas virtuales (VPN) y Redes de Área Ampla (WAN).
- Comunicaciones por satélite.
- Servicios de alquiler de capacidad. Por ejemplo alquiler de fibras ópticas o de enlaces troncales.

2.3. Procesos de Negocio

Para mejorar los servicios brindados al cliente, implantar nuevos servicios en el mercado, eliminar las ineficiencias y cumplir con las regulaciones legales, es necesario implementar en las empresas una política de gestión de los procesos de negocios (BPM). Sin embargo, desde el momento en que en una empresa se decide la necesidad del cambio al enfoque de procesos, comienza un duro trabajo que involucra:

- decidir cómo se lleva a cabo la reingeniería de procesos o dicho de otro modo, el mejoramiento continuo de los mismos;
- buscar la automatización de los procesos al máximo nivel posible, asegurando la integración eficiente de aplicaciones y de datos entre los sistemas involucrados en esos procesos (aunque aún así, siempre quedarán tareas manuales dentro de los procesos);
- lograr la alineación entre lo que pueden proporcionar las tecnologías disponibles y los objetivos estratégicos que tenga la empresa;
- prestar especial atención a la resolución de los procesos interorganizacionales, es decir, aquellos en los que intervienen diferentes organizaciones medianamente independientes, dentro de la compañía.

Este trabajo involucra a muchas personas, con funciones heterogéneas que deben coordinarse para satisfacer esa necesidad, requiere un trabajo en equipo y una participación de todos. Especialmente requiere disponer de trabajadores altamente cualificados, especialistas en procesos, con una gran capacidad de visión global, de conocimiento interdisciplinar, de diálogo, y capacidad de generar consenso entre diferentes interlocutores. Y finalmente se debe contar con la colaboración de la alta dirección, o sea, gente con la capacidad ejecutiva de tomar las decisiones aconsejadas por el equipo de procesos (puesto que de nada sirve un buen trabajo de reingeniería de procesos si se queda en un trabajo teórico que nunca se lleva a la práctica).

Los procesos están implícitos dentro de una organización, ocultos dentro de una red de personas y sistemas que evolucionan a través de los años. Por esta razón los procesos son, frecuentemente, difíciles de definir formalmente, y como consecuencia se hace espinoso para muchas organizaciones entender como funcionan exactamente, y más aún, trabajar para mejorarlos.

Muchos enfoques, estándares, metodologías y modelos aparecen en la literatura científica para ayudar en esta tarea. Entre ellos, tenemos los que son aplicables a cualquier tipo de organización como BPM, BRP, EAI, y otros que son más específicos para empresas de telecomunicaciones como eTOM, SID, TAM, y TNA, además de ITIL que ofrece guías para la administración de los procesos de tecnología de la información (TI). Es necesario conocer las características de estos marcos de referencia para aplicarlos correctamente, seleccionando las mejores prácticas para su implementación. La experiencia dice que un proceso de reingeniería de procesos tiene que ser bien planificado, y que el éxito está dado en la utilización en cada momento de la técnica más adecuada con los recursos necesarios y de acuerdo a los objetivos establecidos. Es por ello que las empresas de telecomunicaciones requieren de un instrumento metodológico adecuado y pertinente que les permita accionar de manera ágil, proactiva y estratégica sobre los procesos de negocio en su organización.

2.4. Departamentos y procesos internos. Visión Clásica

Como toda empresa mediana o grande, una compañía Operadora de Telecomunicaciones deberá tener varios departamentos especializados en tareas diversas, cada uno de ellos compuestos por equipos de personas más o menos numerosos (dependiendo del tamaño de la empresa).

Al estar compuesto por un gran número de integrantes es vital que exista una buena coordinación para mantener el orden y evitar ineficiencias. La figura del coordinador es esencial, y debe ser una persona con muy buena visión global y dotes de mando. No olvidemos que en el fondo son equipos de trabajo formados por personas y dirigidos por personas. Las personas no son máquinas, tienen sus errores, sus sentimientos sus inquietudes. Y es muy importante saber manejar todos estos factores para un buen funcionamiento del departamento.

Además, el responsable de cada departamento rinde cuentas por los costes incurridos por el trabajo de su personal. Por eso buscar la eficiencia en la operación es el principal objetivo.

La clasificación clásica de los departamentos o unidades que podemos encontrar en una Operadora, relacionados con la red de telecomunicaciones, se describe en la M.3200 [35], y es la siguiente:

- Áreas Preservicio. Engloba las tareas previas a la puesta en marcha de los servicios a los clientes finales. Consta de:
 - Diseño y prospección tecnológica,
 - Planificación y Programación de Obras
 - Instalaciones (Creación de Red)
- Áreas En Servicio. Engloba las tareas a partir de la puesta en servicio de los productos. Consta de:
 - Provisión
 - Supervisión
 - Operación y Mantenimiento
 - Gestión de la seguridad
 - Contabilidad o Facturación
 - Atención al cliente

Figura 15: Áreas Funcionales de gestión (visión clásica)

Entre todas estas áreas/departamentos, en el presente trabajo nos centraremos exclusivamente en las más relacionadas con la red, en los siguientes apartados, dejando aparte la profundización sobre áreas más alejadas del problema que nos ocupa, como la Facturación o la Atención al cliente.

Otra clasificación clásica que afecta, en este caso, al ámbito en el cual se desarrollan las tareas de gestión, habla de lo que se denominan “Niveles de Gestión”. Es una clasificación ortogonal a la anterior, y podríamos decir, que dentro de cada uno de los departamentos o unidades anteriores podemos encontrar los siguientes niveles de responsabilidad.

- Nivel de negocio
- Nivel de servicio
- Nivel de red
- Nivel de elemento de red

Figura 16: Pirámide de los niveles de gestión (visión clásica)

La idea de subdividir la responsabilidad en niveles o capas fue una de las mejores ideas de la visión clásica, recogida en las recomendaciones de la serie TMN [27] [35]. La descomposición en estos llamados “niveles lógicos de gestión” facilita enfrentarse al problema de gestionar una red. De forma resumida podemos decir que una capa enmascara la complejidad de la gestión de su nivel, hacia la capa “superior”, ofreciéndole una visión sintetizada de la misma. Esta relación entre capas suele denominarse como relación agente-gestor. Una determinada capa juega el rol de “agente” de cara a la capa superior, y puede realizar el rol de “gestor” con respecto a una capa inferior. Y así de forma recursiva.

Figura 17: Niveles de gestión. Relación agente-gestor

El nivel de elemento de red se encarga de las funciones de gestión más básicas, más próximas a los equipos físicos que están instalados, de manera individual. Como ejemplo de funciones que se llevan a cabo en este nivel tendríamos: detección de errores de equipos, medida de consumo de energía eléctrica, medida de temperatura de equipos, registro de mediciones estadísticas, etc.

En el nivel de red se trata de gestionar la interacción entre un conjunto de equipos, es decir, de gestionar las redes como un todo, sin caer en el detalle de los equipos individuales que las forman. Las redes pueden ser de mayor o menor extensión según se quiera definir y acotar el problema de

gestión (conceptos de estratificación y subdivisión recogidos en las recomendaciones G803 [7] y G805 [8] de la ITU-T). Ejemplo de tareas de gestión que se corresponden a este nivel serían: monitorización de enlaces, gestión de tablas de enrutado, creación de vistas de red, creación de rutas dedicadas a nivel de red, detección de fallos de red, optimización del rendimiento global de una red, configuración de red, etc.

El nivel de servicio abarca las tareas que pueden ser observadas directamente por los usuarios finales de una red de telecomunicación, es decir, precisamente eso son los servicios que comercializa la operadora. Los usuarios pueden ser clientes finales o pueden ser otras empresas proveedoras de servicios. Un ejemplo típico de esto último podría ser una operadora proveedora de servicios IP, que esté utilizando enlaces ATM, SDH o DWDM de otras operadoras, para conectar sus *routers* IP. Ejemplos de funcionalidades de este nivel son: gestión de la calidad de servicio (retardo, pérdidas, etc.), facturación, creación y provisión de clientes, atención a clientes, recogida de reclamaciones de clientes, etc.

El nivel de negocio es responsable de las tareas de gestión que conciernen al global de una empresa o compañía. Caen en este nivel las tareas de tipo táctico y estratégico, en lugar de las tareas de tipo operacional que son las que quedan cubiertas por el resto de niveles.

2.4.1. Diseño y prospección tecnológica

Tiene como misión sentar las bases de las nuevas tecnologías que se van a implantar en la operadora, y realizar los diseños iniciales.

Figura 18: Diseño y prospección tecnológica

Podríamos resumir su trabajo en los siguientes puntos:

- A nivel de equipos de red:
 - Incorporación de nuevas tecnologías. Laboratorios de pruebas. Maquetas.

- Especificación de protocolos de gestión.
- A nivel de visión global de red:
 - Topologías de conexión.
 - Elección de esquemas de nombrado y direccionamiento.
 - Selección de protocolos.
- A nivel de servicios:
 - Determinación de segmentos de mercado.
 - Selección de tecnologías de soporte.
 - Especificación de componentes de servicio.
 - Definición de perfiles de usuario.

2.4.2. Planificación y Programación de Obras

Esta unidad o departamento se encarga de la planificación de los despliegues de red.

Una Operadora debe estar continuamente aumentando y mejorando su red para poder dar cobertura a las crecientes demandas de servicios para sus usuarios, o a los nuevos servicios ideados por los departamentos de marketing o de investigación y desarrollo.

Esto implica la instalación de nuevos equipos, nuevos cableados, o la sustitución de equipamientos existentes por otros más modernos y más potentes. Todos estos cambios deben diseñarse y planificarse adecuadamente.

Los procesos que engloban la actividad de esta Unidad, son los siguientes:

- Ocupación de la Planta. Tiene por objeto el estudio de la ocupación de los diferentes recursos de la Red.
- Definición de nuevas secciones y dimensionado de equipos. Cuyo objetivo es planificar ampliaciones de la Red.

La ejecución física de todos los cambios en la red no la lleva a cabo este departamento sino que es la misión del departamento de Instalaciones.

2.4.3. Instalaciones (Creación de Red)

La unidad o departamento de Instalaciones, a veces llamado de Ingeniería se ocupa principalmente del proceso global de Creación de Red.

Este departamento es el que ejecuta los diseños que generan en el departamento de Planificación y Programación de Obras. Es decir es el que lleva a cabo las instalaciones reales en la red. Además lo hace de acuerdo a las planificaciones que recibe. Como premisa, la instalación de nueva planta debe influir lo menos posible en el funcionamiento normal de la planta ya instalada, a lo cual hay que prestar especial importancia en los casos de sustitución de unas instalaciones por otras.

Este proceso global se puede dividir en los siguientes subprocesos:

- Creación de Red (JDS, WDM). Tiene por objetivo la ampliación o modificación de elementos físicos de la red y sus actuaciones en los diferentes sistemas (Gestores de red de los diferentes fabricantes, y sistemas integrados de gestión, como pueden ser ATLAS y DITRA en Telefónica de España).
- Creación de Trayectos de Infraestructura. Su objetivo es modificar la conectividad de la Red de Transporte.

2.4.4. Provisión

La actividad de provisión podría definirse como el conjunto de tareas relativas a la activación y entrega final del servicio para el cliente.

En algunos casos no existe una frontera clara entre las tareas de creación y de red y las tareas de activación. Sin embargo la norma general suele ser la de favorecer que el proceso de provisión sea lo más rápido posible en el tiempo. Es decir se tiende a preconfigurar al máximo posible la red y los equipos, a establecer y constituir al máximo las conexiones (sin llegar a ser las conexiones definitivas), de manera que cuando un cliente solicita un determinado servicio sólo sea necesario activar el tramo “final” de ese servicio, consiguiendo así un tiempo de respuesta muy rápido. Siguiendo este procedimiento se aumenta la cantidad de provisiones que se puede hacer en una red por unidad de tiempo, hasta el punto de poder hacerlas casi on-line cuando un cliente lo solicita directamente a través de los canales comerciales. Esto es posible a costa de derivar gran parte del trabajo de constitución de los servicios al tiempo de creación de red, el cual se puede efectuar fuera del horario, digamos “comercial”, cuando no existe la presión de la venta, principalmente en horario nocturno.

En la provisión de servicios de Banda Ancha es habitual partir de los puertos de acceso en una situación de preprovisión, es decir, toda la comunicación está ya establecida hasta el puerto de lado abonado del equipo de acceso. En ese caso la provisión consta simplemente de una tarea de activación o desbloqueo del puerto en dicho equipo. El resto de tareas previamente realizadas deben considerarse como parte de la creación de red.

El proceso global de Provisión de Circuitos Punto a Punto se puede dividir en 4 subprocesos:

- Órdenes de alta de circuitos: son las peticiones de circuitos nuevos.
- Órdenes de baja de circuitos: peticiones de baja de circuitos en servicio.
- Órdenes de reconfiguración de circuitos (traslados): peticiones de modificación de uno de los extremos del circuito.
- Órdenes de reasignación interna: Modificación total o parcial de la ruta de un circuito.

2.4.5. Supervisión

Este departamento tiene como misión la supervisión de las alarmas de la Red en tiempo real, y la recogida de medidas de prestaciones (performance) en puntos determinados de la planta.

Se identificará aquellas alarmas cuya existencia no se deba a un trabajo programado así como las debidas a actuaciones para la creación de red o provisión de circuitos, con el fin de generar un boletín de incidencias en el Sistema de Incidencias que se haya designado.

El objetivo de una supervisión proactiva es detectar los fallos y corregirlos antes de que ningún cliente final reclame por ello.

2.4.6. Operación y Mantenimiento

Los procesos que pueden englobar la actividad principal de la Unidad de O+M, son dos:

- Mantenimiento proactivo o preventivo. Cuyo objetivo es lograr la disponibilidad del servicio ofrecido por la Red de Transporte, con un reducido número de incidencias y avisos de avería en la red, y detectar de forma precoz los síntomas de problemas y fallos.
- Mantenimiento correctivo. Tiene por objetivo acortar los tiempos de restauración de servicio y resolución de incidencias tanto de la Planta como de las detectadas en la provisión.

Procesos más detallados:

- Mantenimiento preventivo. Subprocesos:
 - Gestión de Trabajos Programados
 - Ejecución de Boletín de Trabajo Programado
 - Gestión de orden de Reconfiguración
 - Medición de calidad de Red (no es supervisión??)
- Mantenimiento Correctivo. Subprocesos
 - Tratamiento de Avería en red
 - Tratamiento de Incidencia en un sistema
 - Tratamiento de Incidencia en red

2.5. Procesos internos. Enfoque eTOM

En este apartado se realiza un breve resumen de la clasificación de los procesos de negocio de una operadora de telecomunicación que realiza el TMForum [37], organismo de referencia en la estandarización de procesos relativos a la industria de las telecomunicaciones. Concretamente su propuesta se denomina eTOM “*Enhanced Telecom Operations Map*” (Mapa de Operación de Telecomunicaciones Mejorado) [28].

El Mapa de Operación de Telecomunicaciones Mejorado tiene como propósito servir de marco de referencia para los procesos en las compañías Operadoras de telecomunicación. El mapa eTOM está organizado en niveles, de forma jerárquica y describe todos los procesos que deben usar las compañías de este sector. Su diseño, tiene en cuenta que existen procesos interorganizacionales que poseen interfaces con el cliente final (nivel que es dibujado siempre en la parte superior del mapa), y otros que poseen interfaz con los socios/proveedores de la propia compañía (nivel dibujado siempre en la parte inferior del mapa).

Figura 19: eTOM nivel 1

El mapa eTOM abarca tres grandes áreas: Estrategia-Infraestructura-Productos, Operaciones y Gestión Empresarial (o Soporte a la Empresa). Así se describe en la M.3050.1 [29].

En las áreas de Operaciones y Estrategia-Infraestructura-Productos existen divisiones verticales y horizontales [30]. Las verticales representan flujos de procesos extremo a extremo y son los siguientes (procesos de nivel 1 de detalle):

- Área de Estrategia-Infraestructura-Productos
 - Estrategia y Compromiso
 - Gestión del ciclo de vida de la Infraestructura
 - Gestión del ciclo de vida del Producto
- Área de Operaciones
 - Soporte a la Operación y Puesta en marcha
 - Provisión
 - Mantenimiento
 - Facturación

Estos flujos extremo a extremo (descritos en la M.3050.3 [31]) recorren las capas horizontales las cuales representan a qué nivel funcional se “ejecuta” el proceso:

- A nivel de la interfaz con el cliente,
- a nivel de servicios,
- a nivel de recursos
- y al de la interfaz con los socios y proveedores.

eTOM fue diseñado y desarrollado para describir los procesos de las empresas en el sector de la Telecomunicaciones. Dado su éxito y amplio uso por los proveedores de servicio y los desarrolladores de aplicaciones fue rápidamente adoptado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), la cual recoge todo su contenido en la Recomendación M.3050 [28]. A pesar de todo esto su alcance se ha extendido más allá, ya que otras empresas fundamentalmente en el área de los servicios han comenzado a utilizar los principales conceptos de eTOM, sobre todo los expuestos en los niveles superiores.

El mapa de procesos de telecomunicaciones sin embargo sólo se limita a la descripción de los procesos, no establece como implementarlos.

Veamos a continuación los flujos detallados (procesos de nivel 2 de detalle) que se encuentran dentro de cada bloque de procesos de nivel 1.

Figura 20: eTOM nivel 2. Estrategia-Infraestructura-Productos

2.5.1. Estrategia y Compromiso

En el área de Estrategia-Infraestructura-Productos, al nivel superior, de “Interfaz con el cliente”, se le cambia el nombre y se le denomina específicamente nivel de “Marketing y Gestión de la Oferta”. Y análogamente, al nivel inferior, de “Interfaz con Socios y Proveedores”, se le denomina específicamente nivel de “Gestión y Desarrollo de la cadena de Aprovisionamiento”.

Los flujos de Estrategia y Compromiso, en los diferentes niveles, son los siguientes:

- Nivel de Marketing y Gestión de la Oferta
 - Políticas y Estrategias de Mercado
 - Planificación del Portfolio de Productos y Ofertas
- Nivel de Servicio (Gestión y Desarrollo del Servicio)
 - Políticas y Estrategia de Servicios
 - Planificación y Compromiso de Servicios
- Nivel de Recursos (Gestión y Desarrollo de los Recursos)
 - Políticas y Estrategia de Recursos y Tecnologías
 - Planificación de Recursos y Tecnologías
- Nivel de Gestión y Desarrollo de la cadena de Aprovisionamiento
 - Estrategia y Planificación de la cadena de aprovisionamiento

2.5.2. Gestión del ciclo de vida de la Infraestructura

Los flujos de la Gestión del ciclo de vida de la Infraestructura, en los diferentes niveles, son los siguientes:

- Nivel de Marketing y Gestión de la Oferta
 - Capacidad de Entrega de Productos y Ofertas
 - Capacidad de despliegue de Marketing
 - Capacidad de Despliegue de la Gestión de Relación con los Clientes (CRM).
- Nivel de Servicio (Gestión y Desarrollo del Servicio)
 - Capacidad de Entrega / Despliegue de Servicios
- Nivel de Recursos (Gestión y Desarrollo de los Recursos)
 - Capacidad de Entrega / Despliegue de Recursos y Operaciones
- Nivel de Gestión y Desarrollo de la cadena de Aprovisionamiento
 - Capacidad de Entrega / Despliegue de la cadena de aprovisionamiento

2.5.3. Gestión del ciclo de vida del Producto

En los diferentes niveles, se tienen los siguientes flujos:

- Nivel de Marketing y Gestión de la Oferta
 - Desarrollo y retirada de productos y ofertas.
 - Desarrollo de ventas.
 - Comunicaciones y promociones de marketing.
- Nivel de Servicio (Gestión y Desarrollo del Servicio)
 - Desarrollo y retirada de Servicios.
- Nivel de Recursos (Gestión y Desarrollo de los Recursos)
 - Desarrollo y retirada de Recursos.
 - Planificación de Recursos y Tecnologías.
- Nivel de Gestión y Desarrollo de la cadena de Aprovisionamiento
 - Gestión del cambio y desarrollo de la cadena de aprovisionamiento.

2.5.4. Soporte a la Operación y Puesta en marcha

En los diferentes niveles, se tienen los siguientes flujos:

- Nivel de Gestión de relación con el Cliente
 - Soporte a las operaciones de puesta en marcha.
- Nivel de Servicio (Gestión del Servicio y Operaciones)
 - Soporte a las operaciones de servicio y puesta en marcha.
- Nivel de Recursos (Gestión de Recursos y Operaciones)
 - Soporte a las operaciones de recurso y puesta en marcha.
- Nivel de Gestión de relación con Proveedores y Asociados
 - Soporte a las operaciones de relación con Proveedores y Asociados, y puesta en marcha.

Figura 21: eTOM nivel 2. Operaciones

2.5.5. Provisión

La actividad de provisión es el conjunto de tareas relativas a la activación y entrega final del servicio para el cliente.

En los diferentes niveles, se tienen los siguientes flujos:

- Nivel de Gestión de relación con el Cliente:
 - Gestión de la interfaz con el cliente.
 - Tasa de respuesta a campañas de marketing.
 - Ventas.
 - Gestión de pedidos.
- Nivel de Servicio (Gestión del Servicio y Operaciones):
 - Configuración y activación del servicio.
- Nivel de Recursos (Gestión de Recursos y Operaciones):

- Provisión de recursos. Son los recursos necesarios para el funcionamiento del servicio. Por ejemplo activar un puerto en un equipo.
- Recolección de datos de recursos y procesado, con el fin de tener un inventariado completo y fiable de recursos.
- Nivel de Gestión de relación con Proveedores y Asociados:
 - Gestión de adquisiciones.
 - Gestión de la interfaz con Proveedores y Asociados.

2.5.6. Mantenimiento

Tareas relativas al mantenimiento y reparación de los servicios ante incidencias o interrupciones de los mismos. También incluye trabajos programados en previsión de prevenir futuros problemas en la prestación de los servicios.

En los diferentes niveles, se tienen los siguientes flujos:

- Nivel de Gestión de relación con el Cliente:
 - Gestión de la interfaz con el cliente.
 - Gestión de incidencias.
 - Gestión de Calidad de Servicio (Qos) y Acuerdos de Nivel de Servicio (SLA) del cliente.
 - Retención y fidelización del cliente.
- Nivel de Servicio (Gestión del Servicio y Operaciones):
 - Gestión de incidencias a nivel de servicio.
 - Gestión de calidad del servicio
- Nivel de Recursos (Gestión de Recursos y Operaciones):
 - Gestión de incidencias a nivel de recursos.
 - Gestión de calidad de los recursos.
 - Recolección de datos de recursos y procesado, con el fin de tener un inventariado completo y fiable de recursos.
- Nivel de Gestión de relación con Proveedores y Asociados:
 - Gestión e informes de incidencias de Proveedores y Asociados.
 - Gestión de prestaciones de Proveedores y Asociados.
 - Gestión de la interfaz con Proveedores y Asociados.

2.5.7. Facturación

Tareas relativas a la facturación de los servicios prestados a los clientes.

En los diferentes niveles, se tienen los siguientes flujos:

- Nivel de Gestión de relación con el Cliente:
 - Gestión de la interfaz con el cliente.
 - Gestión de la facturación y de los pagos.
 - Retención y fidelización del cliente.
- Nivel de Servicio (Gestión del Servicio y Operaciones):
 - Tarificación del servicio y casos específicos.
- Nivel de Recursos (Gestión de Recursos y Operaciones):
 - Recolección de datos de recursos y procesado.
- Nivel de Gestión de relación con Proveedores y Asociados:
 - Gestión de la facturación y convenios.
 - Gestión de la interfaz con Proveedores y Asociados.

2.6. Sistemas de Gestión

Dada la complejidad y tamaño que suelen tener las redes de telecomunicación de una Operadora, es imposible plantearse realizar manualmente todas las operaciones de gestión que se necesitan, por tanto se hace necesario disponer de sistemas informáticos que automaticen la gestión de dicha red. Estos sistemas se denominan de forma genérica Sistemas de Gestión (*Management Systems*), e incluso disponen de una red de comunicaciones propia (red de gestión) superpuesta a la red de telecomunicaciones que se pretende gestionar.

Por el volumen de datos a gestionar y de funcionalidades a manejar en una Operadora no existirá uno, sino que se necesitarán varios sistemas de gestión. En un caso genérico podríamos hablar de decenas de sistemas. Cada uno de ellos estará especializado en uno o varios de los procesos que hemos comentado en los apartados anteriores.

Es en este contexto en el que debemos introducir el importante concepto de **Mapa de Sistemas**. La definición de este mapa sería el conjunto de documentación que proporciona la visión global de todos los sistemas que existen en la Operadora. Es muy importante, que en una compañía, este mapa esté definido al máximo nivel de detalle posible, pues de esta manera se lograrán evitar posibles solapamientos o carencias de funcionalidad. La definición del mapa debe incluir:

- diagramas con todos los sistemas,
- sus interacciones,
- sus interfaces,
- los datos que intercambian,
- las funcionalidades que soporta cada sistema,
- las funcionalidades que se soportan entre varios sistemas,

El TMForum realiza también una clasificación formal de las funcionalidades o aplicaciones que pueden existir en los sistemas de una operadora de telecomunicación. Esta clasificación se denomina TAM “*Telecom Applications Map*” (Mapa de Aplicaciones de Telecomunicación) y sirve como un marco de referencia que ayuda a clasificar los sistemas que podemos encontrarnos. De la misma manera que el eTOM define procesos, podríamos decir que el TAM define sistemas reconocibles, sobre los cuales se implementarán dichos procesos. Evidentemente existe un mapeo bastante obvio entre aplicaciones del TAM y procesos eTOM, concretamente con los procesos de nivel 2 de detalle (usan nombres muy parecidos e incluso a veces los mismos).

Figura 22: TAM. Mapa de Aplicaciones de Telecomunicación

2.6.1. Integración de sistemas

Aunque en una Operadora existan varios sistemas de gestión, éstos no pueden funcionar de manera totalmente independiente. Es necesario que se interrelacionen entre ellos. En el fondo, la red y los servicios que gestionan son los mismos para todos los sistemas. Será habitual que compartan datos (que pueden residir en la misma base de datos o replicarse de unos sistemas a otros). En definitiva, siempre surgen la necesidad de una integración de los sistemas.

A veces la necesidad de integración surge entre sistemas ya existentes. Otras veces aparece cuando se trata de implantar un nuevo sistema, dentro de un mapa de sistemas, y el nuevo debe colaborar con los demás.

También podríamos englobar aquí las tareas de configuración de paquetes de *software* comerciales que se pretendan instalar como un nuevo sistema. Es decir, no siempre hablamos de desarrollos a medida, sino que también de productos comerciales que tras ciertas adaptaciones y configuraciones son instalados en la operadora.

La tarea de integración de sistemas es muy compleja y es una de las que más coste genera dentro de una compañía. Además es una tarea que inevitablemente hay que afrontar. Continuamente las redes evolucionan, también aparecen servicios nuevos, y todas estas novedades demandan nuevos sistemas que las gestionen.

Hay que tener en cuenta que, a no ser que tengamos una compañía Operadora que se acaba de crear, no se puede partir de cero. Cada vez que deseemos instalar un sistema nuevo se deberá integrar con sistemas ya existentes, pudiéndose encontrar un escenario de los más variopinto. Algunos de esos sistemas existentes serán mucho más antiguos, otros contruidos con tecnologías diferentes, otros pueden tener datos o funcionalidades similares con las que hay que convivir, pueden tener complejas restricciones de funcionamiento o de interconexión, etc.

El problema de la integración de las diferentes bases de datos de los sistemas se trata, más adelante, en un apartado exclusivo dedicado a ello.

2.6.2. Claves para una integración con éxito

Aparte de lo evidente, disponer de presupuesto y tiempo, son destacables las siguientes claves para el éxito de esta tarea:

Sistemas documentados:

En una compañía Operadora, todos y cada uno de los sistemas de gestión que se tengan deben disponer de una buena y detallada documentación, la cual debe incluir información de arquitectura (tanto *software* como *hardware*), descripción del modelo de sus bases de datos, interfaces internas, interfaces externas (incluyendo interfaces gráficas de usuario), funcionalidad detallada, etc.

Esto incluye también a los productos comerciales. Cuando se pretenda instalar un producto o una *suite* de productos *software* comerciales que necesiten cierta configuración, es necesario conocer el máximo detalle del producto. El fabricante debe proporcionar información detallada de funcionalidad, arquitectura, necesidades de *hardware*, limitaciones, restricciones de funcionamiento, escalabilidad, capacidad de procesamiento, interfaces, etc. Incluso a veces lo más útil es poder contar con un asesor experto que tenga un conocimiento profundo del producto.

Visión Global:

Lo habitual es que cada uno de los sistemas instalados haya sido desarrollado por una empresa diferente (buscando un ahorro de costes, tras haber organizado un concurso para el cumplimiento de

una serie de requisitos). Esto quiere decir que cada sistema habrá sido documentado por separado por cada empresa desarrolladora.

Sin embargo esto no es suficiente. Es necesario disponer de una documentación de conjunto que proporcione una visión global de todos los sistemas. Una documentación que detalle el **mapa de sistemas** existente, con el papel de cada sistema en los procesos de la operadora, sus interrelaciones y dependencias. Esta documentación debe ser elaborada por el personal de la operadora, ya que los expertos de cada sistema particular sólo suelen tener la visión parcial de su propio sistema y nada más.

Sólo basándose en esa documentación global de conjunto es posible diseñar nuevos sistemas pensando en la manera en la que encajarán en los procesos de negocio, y colaborarán con los sistemas ya implantados.

Interlocutores válidos:

Una buena documentación, tanto de los sistemas individuales como de su funcionamiento conjunto, es necesaria pero no suficiente para garantizar un proyecto de integración. Para integrar un nuevo sistema es necesario realizar documentación detallada del mismo y organizar reuniones para intercambiar esa información y llegar a acuerdos sobre las interconexiones y colaboraciones con los sistemas existentes. En estas reuniones hay que contar con interlocutores válidos que en conjunto cumplan estas condiciones:

- Posean conocimiento detallado de los sistemas involucrados en la integración.
- Posean conocimiento de los procesos globales de la operadora.
- Tengan poder de decisión para ordenar la ejecución de los acuerdos tomados.

Sin cumplir estas condiciones las negociaciones se eternizan: las reuniones son improductivas por desconocimiento técnico de los asistentes, se repiten muchas veces las mismas cosas por rotación de los interlocutores de los sistemas, se malentienden los acuerdos por no profundizar en los detalles, o se llega a acuerdos que luego no se ejecutan por no tener poder de ordenar una implementación. La consecuencia de todo esto será con toda seguridad un incumplimiento de los plazos del proyecto y un sobrecoste sobre la cantidad inicial presupuestada.

Encontrar e identificar estos interlocutores válidos no es fácil. Tanto es así que muchas veces es necesario contratar consultores externos a la compañía, que sean realmente imparciales, se estudien a fondo todos los sistemas y procesos, y sean dotados con el poder de imponer soluciones a todos los participantes en la integración.

Cubrir todos los aspectos:

No basta con llegar a acuerdos de alto nivel, sino que hay que bajar al detalle de cada uno de los aspectos de la integración:

- Aspectos funcionales: funcionalidades de los sistemas e interfaces entre ellos (con todo el detalle de mensajes, campos y valores de los mismos).

- Aspectos de rendimiento de las soluciones: más allá de la funcionalidad es necesario estudiar el rendimiento. Es posible que un proceso tenga un buen diseño funcional, que su lógica sea perfecta cubriendo toda una serie de casuísticas, pero puede ocurrir que al ejecutar decenas de instancias de dicho proceso en paralelo, cargue tanto las máquinas que sea imposible de ejecutarse.
- Aspectos de arquitectura: arquitectura hardware y software.

Impacto en procedimientos manuales:

En la mayoría de los sistemas todavía existen tareas que se deben realizar manualmente o que deben ser atendidas por un operador humano. Sobre todo las relativas al tratamiento de excepciones o funcionamientos anómalos.

En una integración de un sistema nuevo es necesario describir al detalle cómo se va a usar el sistema y, adicionalmente, cómo va a cambiar el uso del resto de sistemas con los que se relaciona.

Debe generarse una buena documentación de los procedimientos manuales y programar una formación, sobre esos procedimientos, a todos los operadores que se vayan a encargar de esa tarea. No debe quedar nada al azar, puesto que los procedimientos manuales van a ser una de las mayores causas de errores en los procesos. No debe dudarse en invertir esfuerzo para conseguir buenas guías de actuación, en los procedimientos manuales, para todas las casuísticas que se le puedan presentar al operador.

Voluntad de integración:

Todo lo anterior no servirá de nada si no hay voluntad, por parte de los responsables de los sistemas implicados, de integrarlos. Correos sin respuesta, reuniones improductivas, acuerdos que no se cumplen, fechas que se retrasan, etc., serían claros síntomas que no hay voluntad de llegar a un acuerdo productivo. Es probable que alguno de los implicados no esté interesado en la integración porque, por ejemplo, suponga una reducción de funcionalidades en el sistema bajo su cargo, y por tanto una reducción de su presupuesto. En esos casos es necesaria una decisión ejecutiva de algún jefe superior o directivo que desbloquee la situación.

2.7. Inventariado de datos

En este apartado se repasa uno de los aspectos más importantes de la gestión de las redes de telecomunicación, que son los inventarios de datos. Un ejemplo de esta importancia, aplicado a la red troncal de Telefónica de España, podemos encontrarlo en [121], en el que se describe un sistema en el que el autor de este trabajo estuvo participando activamente, tanto en su definición inicial como en su implementación posterior.

2.7.1. La importancia de los datos

Como queda explicado en cualquier buen libro sobre inventarios o sobre base de datos, la verdadera importancia de los mismos no reside en la tecnología con la que están implementados, sino que la constituyen los propios datos. Eso es lo más importante de una base de datos.

Los sistemas de gestión de una operadora de telecomunicación siempre necesitan datos para funcionar. La ITU y el TMForum también se han encargado de normalizar los conceptos que deben modelarse en una base de datos de una red de telecomunicación, y se describen en la recomendación M.3190 [34].

El problema aparece cuando no sólo se tiene un sistema único y centralizado sino que se tienen varios sistemas de gestión. En cualquier operadora de tamaño medio e incluso pequeño encontraremos que se utilizan varios sistemas de gestión, y como hemos mencionado antes, cada uno necesitará datos para su funcionamiento.

La razón para que nos encontremos varios sistemas de gestión en la misma operadora, es clara. Las redes de telecomunicación suelen ser heterogéneas. La tecnología evoluciona muy rápido en el tiempo, los avances se suceden con mucha rapidez, por lo que es imposible que una operadora tenga su red actualizada con la última tecnología del mercado. Lo habitual es que en la red de una operadora convivan tecnologías más modernas con otras más antiguas, las cuales se siguen utilizando hasta que se consideran amortizadas. La existencia de diferentes tecnologías implica la existencia de diferentes sistemas de gestión.

Otra de las razones es la existencia de varios departamentos en la compañía, y la consiguiente división del trabajo que existe entre ellos. Cada departamento se dedica a una o varias tareas concretas y demanda funcionalidades de gestión diferentes a la del resto de departamentos. Es muy difícil que un único sistema informático sea capaz de satisfacer las necesidades de gestión de todos los departamentos. Por ello lo habitual es encontrar que cada departamento posee una colección de sistemas de gestión, e incluso defiende la utilización de los mismos como rasgo distintivo ante la posible imposición de los sistemas utilizados en otros departamentos.

Esta casuística no sólo la encontramos en una operadora de telecomunicación sino que es algo común en cualquier compañía que disponga de sistemas de gestión de cualquier índole (redes eléctricas, distribución de gas, etc.).

El hecho de que existan diferentes sistemas de gestión especializados, con las tecnologías de que se disponen hoy en día, no tendría por qué suponer que cada sistema de gestión deba poseer su propia base de datos especializada. Si bien es cierto que cada sistema de gestión, dedicado a cada tarea específica, tendrá sus propias necesidades de datos que no tendrán otros sistemas, otros datos deberán ser comunes a todos los sistemas.

Poniendo un ejemplo, si un sistema se dedica a tomar medidas de calidad de servicio, estará almacenando datos de tipo “tiempo medio entre errores”, “tiempo de indisponibilidad del servicio”, etc. Otro sistema que se dedique a registrar los servicios comerciales que ha contratado cada cliente, estará almacenando datos de tipo “nombres de servicios”, “características de los servicios”, etc. Los ejemplos mencionados hasta ahora serían datos específicos, propios de cada sistema. Sin embargo en ambos sistemas se tendrán inventariados los clientes de la compañía (ya que los datos anteriores

son relativos a los clientes), y los clientes deben estar identificados de la misma manera en ambos sistema. Un cliente es el mismo, con el mismo nombre, apellidos, DNI, teléfono, etc., tanto si lo que estamos haciendo es medir la calidad de sus servicios, como si lo que hacemos es inventariar la lista de servicios que tiene contratados.

Por tanto sería interesante que la información común a varios sistemas (como la lista de clientes) coincida en todas las bases de datos de todos los sistemas. O lo que sería más deseable, de ser posible, esa información debería residir en un repositorio único, para que no exista la posibilidad de que se produzcan desalineamientos de estos datos entre los inventarios de los diferentes sistemas.

Ahora bien, una cosa es lo que el sentido común nos dice que sería deseable, y otra cosa es la realidad que nos solemos encontrar. Cuando un sistema (con su base de datos) es propiedad de un cierto departamento, y es su herramienta de trabajo habitual, será muy difícil que el departamento se muestre a favor de ceder el control de parte de su inventario. Los departamentos tienden a sentirse propietarios de sus sistemas y de sus datos, no recibiendo de buen agrado cualquier tentativa externa de acceder a sus bases de datos o de reubicar, en otros sistemas externos, parte de su información. No olvidemos que los departamentos, o las organizaciones en general, están dirigidos por personas, y esos directivos necesitan justificar su puesto, su trabajo, su presupuesto anual, sus comisiones por objetivos, etc. Para ello necesitan un producto sobre el que orientar su actividad, necesitan “su sistema”. Ceder datos del mismo o ceder funcionalidad para ubicarla en otro sistema significaría una pérdida de poder, cosa que normalmente nadie que ha llegado a un cierto nivel está dispuesto a aceptar.

Si nuestro papel es el de un consultor externo con el objetivo de optimizar los procesos de la compañía, rápidamente debemos detectar todos esos datos comunes que están replicados en diferentes bases de datos desconectadas (residentes en diferentes sistemas), y recomendar la reubicación de los mismos para asegurar su unicidad. En esta tarea nos encontraremos con la oposición de los jefes de los departamentos, los cuales suelen tener unos objetivos propios de su área, y no estarán dispuestos a arriesgarse, modificando sus sistemas o sus inventarios en favor de un supuesto beneficio global para la compañía. Cuando las empresas son grandes, ese beneficio global queda difuminado, y sólo una acción directiva superior, con el suficiente poder de ejecución y de mando sobre los diferentes departamentos, conseguirá llevar esta tarea a buen fin.

2.7.2. Centralizados / Distribuidos

Está claro que ciertos datos deben ser comunes, y tener los mismos valores, en cualquier base de datos en los que se encuentren. Volvamos al ejemplo anterior, los datos identificativos de un cierto cliente: Nombre, Apellidos, DNI, Teléfono, Localidad, Provincia, etc., deben ser los mismos, cualquiera que sea el inventario. Es posible, por ejemplo, que en algún sistema se utilice el nombre completo de la Provincia en la que reside el cliente, y en otro se utilice únicamente una abreviatura. No nos confundamos, en cualquier caso estamos hablando de una provincia, y las provincias son siempre las mismas. Si una vez usamos el nombre completo y otra vez la abreviatura eso quiere decir que debemos almacenar ambos datos por separado como dos atributos de esa entidad. Pero los valores de las provincias deben ser los mismos en todos los sistemas.

Se plantea entonces la alternativa sobre qué es mejor de las dos opciones siguientes:

- que todos estos datos, comunes a todos los sistemas, residan en un repositorio único, centralizados todos en un único sistema;
- o bien, que los datos se distribuyan entre todos los sistemas, teniendo cada sistema únicamente responsabilidad sobre un subconjunto de esos datos.

Figura 23: Datos comunes centralizados

La primera alternativa, la centralización de datos, podría parecer en teoría la más idónea. Los datos comunes residirían en un único repositorio, sin posibilidad de que se produzcan desalineamientos de datos entre varios sistemas, porque precisamente los datos residen en un único lugar. Ese lugar sería un sistema especializado únicamente en Inventario de datos. Sería un sistema independiente del resto de sistemas de gestión de la operadora, y su misión sería tener el inventario de todos los datos comunes y disponibilizarlo al resto de sistemas. Siguiendo con el ejemplo, una tabla con el inventario de todos los clientes de una compañía se consideraría uno de esos datos comunes. Dicha tabla residiría en nuestro sistema de Inventario Centralizado, y cualquier otro sistema que necesitara consultar o actualizar algún cliente o algún dato de algún cliente, deberá conectarse con el sistema de Inventario Centralizado y enviar ahí su petición de transacción.

Ahora bien, la centralización de los datos en un único sistema implica que este sistema va a recibir una gran cantidad de peticiones, tanto de consulta como de actualización de datos, desde el resto de sistemas de la operadora que tengan necesidad de usar esos datos comunes. El sistema de Inventario Centralizado debe ofrecer unos tiempos de respuesta muy cortos ante cualquier solicitud de cualquier sistema externo. Evidentemente también debe garantizar el bloqueo de los datos, de manera que dos sistemas no puedan actualizar a la vez el mismo dato en el inventario. Por supuesto que también debe disponer de una política de copias de seguridad de los datos, puesto que se supone que posee datos únicos que no están replicados en ningún otro sistema.

Resumiendo, en un sistema con un Inventario Centralizado de datos comunes, tendríamos como principal ventaja que es imposible el desalineamiento de esos datos comunes, y como principal desventaja que es sistema tiene unos requerimientos muy grandes de velocidad de respuesta y capacidad de procesamiento.

En la medida que la tecnología va avanzando cada vez disponemos de redes más rápidas y sistemas con mayor capacidad de procesamiento. Sin embargo si el entorno del que disponemos no soporta la instalación de una solución centralizada, deberíamos optar por la alternativa distribuida. En esta alternativa, en lugar de construir un único inventario maestro poseedor de todos los datos comunes, se trataría de distribuir esa información entre diferentes sistemas. Cada sistema se constituiría como el inventario maestro de un subconjunto de los datos comunes (sería el subconjunto propio responsabilidad de ese sistema). Por ejemplo, parece claro que la tabla con el inventario de clientes de la compañía debería residir en un sistema más comercial, cuya misión fuera la gestión de la relación con los clientes. Por el contrario una tabla con los puertos libres de los equipos que hay instalados en la red debería residir en el inventario de un sistema de gestión de elementos de red, puesto que esa es su responsabilidad. Con este esquema obtenemos una división de los datos de los inventarios, pudiendo decir que cada inventario de cada sistema es el inventario “maestro” de un cierto conjunto de datos. Así pues, cuando cualquier sistema necesite acceder a un cierto dato, deberá dirigir una petición al inventario maestro que posea ese dato (para lo cual deberá conocer la ubicación de ese inventario si es que no está en ese mismo sistema).

Figura 24: Datos comunes distribuidos

En el esquema distribuido se necesita un directorio de ubicación de datos, es decir un conocimiento compartido, entre todos los sistemas/inventarios, de dónde reside cada dato, o sea de cuál es el sistema inventario maestro de cada uno de los conjuntos de datos que se manejan entre todos. Si un sistema A necesita consultar un dato que no reside en su propio inventario, tendrá primero que

consultar la información del directorio de ubicación de datos para saber dónde consultar el dato, el cual podrá residir en otro sistema B; y entonces el sistema A realizará su petición de consulta de datos a ese sistema B.

Al igual que en el esquema centralizado, en el distribuido también conseguimos que los datos no queden desalineados, ya que sólo existe un inventario maestro de cada conjunto de datos. Lo que se consigue es no sobrecargar de peticiones de consulta o actualización un único sistema, ya que la información está distribuida en varios sitios diferentes. La desventaja es la necesidad del directorio de ubicación de datos, el cual debe estar correctamente actualizado en cada momento para que no se pierda ninguna solicitud de información sobre los inventarios.

En cualquier caso, en este punto hemos hablado varias veces de datos “comunes”. En los inventarios de los diferentes sistemas de gestión también existirán datos “no comunes”, es decir, datos específicos de cada sistema y que sólo son usados en ese sistema. Estos datos no necesitan estar centralizados ni estar disponibles al resto de sistemas ya que son datos propios de un único sistema. Desde este punto de vista estos datos podrían residir perfectamente en un inventario propio de ese sistema sin por ello perjudicar el diseño de la solución global de gestión en la compañía.

2.7.3. Replicación de datos

La realidad que nos encontramos normalmente, es que en una operadora ya existen muchos sistemas, con su propio inventario, con lo cual no es fácil imponer, en un tiempo breve, una de las soluciones ideales descritas en el apartado anterior. Desarrollar un sistema de gestión suele llevar bastante tiempo y suponer una inversión monetaria también bastante grande, por lo que deben estar diseñados para perdurar en el tiempo, y su sustitución por otro sistema debe estar suficientemente justificada.

Ante la aparición de un nuevo sistema en el mapa de sistemas de una operadora lo único que se puede plantear son ligeras adaptaciones en el resto de sistemas, para que la integración sea un éxito. En una operadora que ya tiene implantados sistemas de gestión funcionando, no se suele disponer ni del tiempo ni del dinero para reorganizar todo el mapa de sistemas y plantear un escenario de inventario único (centralizado o distribuido) desde cero. Cambiar la arquitectura de los sistemas para que en lugar de que consulten una base de datos propia, realicen consultas a un sistema externo va más allá de lo que se considera una adaptación ligera. Normalmente deberemos ajustarnos a esta arquitectura, con lo que la solución que diseñemos deberá respetar la existencia de esas bases de datos locales y todos los accesos a las mismas que se encuentran programados en lo que es el software del propio sistema.

Figura 25: Aparición de un nuevo sistema en un mapa, cada uno con su base de datos

Sin embargo siempre tendremos que velar para que no se produzcan desalineamientos de datos. El nuevo sistema que estemos implantando podrá tener sus conjuntos de datos propios y exclusivos, pero lo más normal es que también deba utilizar datos de los que hemos denominado “comunes” a otros sistemas. Sobre estos datos comunes es necesario definir una estrategia para definir su ciclo de vida, es decir, hay que saber de qué manera se genera cada dato, dónde se guarda, quién lo puede modificar, y hacia qué lugares hay que propagarlo para que pueda ser consultado.

Si en un mapa de sistemas existe más de un sistema maestro del mismo conjunto de datos, algo falla en ese mapa, ese esquema llevará inevitablemente a tener conflictos de desalineamiento de datos. Es muy importante que los procesos encargados de modificar un cierto conjunto de datos estén centralizados y localizados en un único sistema. Y también es importante que todo el mundo lo sepa, que todos los departamentos de la operadora conozcan los procesos de modificación de datos, y por tanto hacia quién deben dirigir una petición de ese tipo cuando les surja la necesidad demostrada de modificar algún dato que no es de su propiedad.

La solución más habitual para estas integraciones de poco impacto es implementar un mecanismo de replicación de datos. Pensemos por ejemplo en la tabla con todos los clientes de la operadora. Existirá un sistema que se definirá como el sistema maestro de esta tabla. El sistema maestro es el único que puede introducir nuevos registros en esa tabla, borrarlos o modificar datos en la misma, por tanto deberá poseer procesos para llevar a cabo estas acciones. Si otro sistema necesita disponer, para su consulta, de todos o alguno de los datos de la tabla de clientes, se debe implementar un proceso de volcado automático y periódico de esos datos, teniendo como origen el sistema maestro. Los procesos de volcados de datos no son la solución ideal, pero es una de las soluciones más inmediatas para resolver el problema planteado. Cada sistema mantiene su base de datos, con la definición y estructura que tuviera en cuanto a sus tablas y atributos. No hay que cambiar nada en cuanto a las funcionalidades internas que hubiera en cada sistema a la hora de acceder a sus bases de

datos. Lo único que se añade, en el sistema que recibe los datos, es un proceso para actualizar el valor de ciertos datos de sus tablas internas (lo cual permitirá que el sistema pueda trabajar con datos más actualizados), pero a partir de ahí, todo es igual que antes de la integración.

Figura 26: Replicación de datos pasando de un sistema a otro

Siempre hay que encontrar un compromiso entre la frecuencia de los volcados y la carga de procesamiento que los mismos imponen, tanto al sistema origen de los datos (encargado de la tarea de generar el volcado), como al sistema que los recibe (que debe procesar los datos del volcado y almacenarlos en su base de datos). Para disminuir la carga de los sistemas podríamos pensar en un único volcado diario, y ejecutado en horas de poca actividad (por la noche), sin embargo eso implica que el sistema destinatario podría tener datos desactualizados en un momento dado.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el volumen de información que viaja en los mencionados volcados. No es lo mismo hablar de miles de registros que hablar de miles de millones, evidentemente. Dependiendo de la necesidad de datos que tenga el sistema receptor podremos encontrarnos en algún caso en el que el volcado puede ser muy voluminoso. Existirá un límite inferior en el periodo entre dos volcados consecutivos que es el tiempo que necesitan los dos sistemas implicados en conjunto, uno para generar el volcado y otro para procesarlo. El tiempo entre volcados no puede ser inferior a ese tiempo de procesamiento porque de lo contrario los volcados se solaparían y los sistemas no tendrían tiempo para procesarlos. Y el tiempo de procesamiento de cada volcado es directamente proporcional al volumen de datos que se estén manejando. Cada vez la tecnología avanza más en este aspecto, produciendo soluciones para mover una gran volumen de datos, entre dos bases de datos, en cada vez menos tiempo.

A pesar de los inconvenientes comentados, los mecanismos de volcados de datos entre sistemas suelen ser la solución más rápida para realizar una integración de mínimo impacto. Los mecanismos de volcado pueden ir desde un, poco sofisticado, mecanismo de intercambio de ficheros (por ejemplo mediante protocolo ftp, en un directorio compartido entre ambos sistemas), hasta arquitecturas mucho más complejas, como por ejemplo vistas implementadas directamente sobre bases de datos, u otros métodos de replicación más eficientes.

2.7.4. Idioma común

En los apartados anteriores hemos hecho referencia a diferentes esquemas de arquitectura de las base de datos de los sistemas de gestión de una Operadora. Hemos comentado que podrían existir diferentes tablas con datos (específicos o comunes) y que esas tablas podrán residir en sistemas centralizados o estar distribuidas en diferentes máquinas. Pero el concepto de “datos comunes” requiere una profundización para llegar al detalle de su problemática.

En algunos ejemplos hemos usado la tabla de clientes como información común que podría ser compartida por varios sistemas. Ahora bien, aquí nos encontramos con un problema semántico, ¿qué se entiende por “cliente”? ¿la palabra “cliente” significa lo mismo para todos los sistemas / usuarios?. La respuesta que normalmente descubrimos es, lamentablemente, que esos conceptos que a primera vista pueden parecer ser comunes y absolutos, no lo son. En un sistema, un “cliente” puede estar representando a una persona física (persona humana) que ha contratado un servicio de telecomunicación, y en otro sistema un “cliente” puede representar a un puerto de un equipo que está ya ocupado, prestando un servicio. Pueden ser cosas parecidas (puesto que al final se necesita un puerto de un equipo para conectar a un cliente), pero en el detalle se demuestra que son cosas distintas. Y cuando trabajamos con programas informáticos no sirven los parecidos, sino que se deben trabajar con exactitudes.

De hecho el término “cliente” no deja de ser sino una simple palabra. Fue la palabra que eligió el diseñador de la base de datos para dar nombre a una tabla de la misma. Ese diseñador, además de elegir el nombre para la tabla, en su momento, también tuvo que decidir los nombres de los atributos (campos) de la misma. Y a cada uno de esos campos también les asignó un nombre. Siguiendo el ejemplo, en una tabla de Clientes podríamos tener los siguientes campos: Nombre, Apellidos, DNI, Teléfono, Localidad, Provincia, etc. Si el diseñador fue lo suficientemente exhaustivo, a cada uno de esos nombres de campos les adjuntó un tipo de dato, una longitud máxima, un formato, una descripción y algunos ejemplos de los valores que puede tomar. Por ejemplo un campo DNI puede llevar al final la letra del código de redundancia del NIF o no llevarla, puede estar justificado con ceros a la izquierda hasta completar 8 dígitos o no estarlo, etc. Un campo que represente un número de Teléfono puede contener al principio, un prefijo nacional o internacional o no tenerlo, puede tener espacios o guiones separando esos prefijos o no tenerlos. Y así sucesivamente se podrían poner multitud de ejemplos de problemas con los formatos de los datos.

El tema se complica con términos cuyo significado es más abstracto y genérico. Por ejemplo la palabra “servicio”. Un servicio puede ser prácticamente cualquier cosa, y de hecho lo es. En estos casos es de vital importancia para la integración de sistemas el que exista una documentación detallada de las bases de datos que se pretenden integrar, e incluso que se pueda disponer de los propios diseñadores de las bases de datos para poder resolver dudas o ambigüedades que

seguramente presentarán la definición de ciertas tablas o atributos. Por muy bien que se haya definido un documento de diseño de una base de datos, ese documento estará escrito en un cierto idioma (incluso puede ser un idioma extranjero), y con el estilo de una cierta persona, con lo que se prestará a posibles equívocos y malinterpretaciones.

El problema de conseguir hablar el mismo “idioma”, de que varias personas distintas entiendan lo que significa un determinado concepto, es el que provoca mayores pérdidas de tiempo y dinero en las reuniones de los equipos de trabajo de integración de sistemas. Hay que tener en cuenta que en un problema de integración de sistemas de gestión, a primera vista puede parecer fácil identificar los datos comunes que existen entre todas las bases de datos del sistema. Pero luego, esa identificación tiene que bajar al máximo nivel de detalle y se tiene que examinar cada tabla, cada campo, cada valor posible de campo, para conseguir llegar a la especificación exacta de los datos comunes. Más aún, al bajar a tanto nivel de detalle, conviene ser muy estricto con el lenguaje que se utiliza en dichas reuniones. No es lo mismo hablar del nombre de un campo, que del nombre del valor de un campo. Hay que utilizar un lenguaje lo más preciso y neutro posible, ejemplificando lo que se dice en cada momento, para una mejor comprensión, y evitando al máximo las ambigüedades del lenguaje. Se debe tener en cuenta que en dichas reuniones las personas asistentes provienen de mundos (sistemas) diferentes, y que en cada uno de ellos la terminología utilizada es diferente.

El problema del idioma común va más allá del entorno de los Inventarios. Podemos ampliarlo a un ámbito más genérico como es el de la propia especificación de todo un sistema. En definitiva toda implementación de un sistema parte de un documento de especificación del mismo, y ese documento no está escrito en un lenguaje de programación (en el cual, si tiene algún fallo, nuestro compilador o nuestro entorno de programación, lo detectará), sino que estará escrito en el idioma propio del país del que se trate, es decir, en texto, y por tanto sujeto a interpretaciones subjetivas. La decisión de implementar un cierto sistema la tomarán personas basándose en lo que esté escrito en ese documento de especificación, pues será ahí donde se explicará la funcionalidad que va a tener el sistema. Y esas personas serán también las que decidirán el dinero que se destina a tal actividad. Por tanto, es de suma importancia redactar con el máximo detalle y precisión toda la documentación relativa a los sistemas.

2.7.5. Identificadores. Traducción de datos.

En todo buen diseño de una base de datos relacional se debe prestar especial atención a la definición de los identificadores o claves únicas que se van a usar en cada una de las tablas.

Una clave única debe ser precisamente eso, única e invariable. A veces nos encontramos con diseños de bases de datos en las que como identificador único se está usando un dato que en un principio se pensó que era invariable, pero que con el transcurso del tiempo ha aparecido algún proceso o funcionalidad que solicita su modificación. Ejemplo de este error es usar como identificador único un número de teléfono, en una tabla donde se almacenan clientes. Al final, cuando aparece la necesidad, o más bien, la posibilidad como proceso de negocio, de cambiarle el número de teléfono a un cliente, nos vemos obligados a cambiar la clave única de un registro de la base de datos, o bien, dependiendo de las restricciones que tenga, deberemos borrar el registro y crear uno nuevo (teniendo en cuenta de que se trata del mismo cliente).

Para evitar estos problemas sobre los identificadores únicos de las entidades modeladas, lo mejor es que dichos identificadores únicos representen valores que no tienen ningún sentido en el negocio de

la operadora. Es decir, por ejemplo, que sean secuencias numéricas sin ningún otro significado que tener un valor único para cada uno de los registros de la tabla en la que se encuentran.

Además, puesto que los datos comunes se comparten entre varios sistemas, es conveniente definir identificadores externos, que serían identificadores propios de cada uno de los sistemas que comparten una cierta información común. Estos identificadores externos estarían definidos como atributos secundarios, puesto que el identificador principal sería el identificador único inicial. Por ejemplo, en una tabla de clientes que estuviese compartida por dos sistemas de gestión diferentes A y B, podríamos tener:

- un identificador único (ID) que sería un número secuencial,
- un identificador externo propio del sistema A (ID_EXT_A), que podría ser un Código de Cliente que siguiera una cierta lógica en sus valores,
- y un identificador externo propio del sistema B (ID_EXT_B), que podría tomar los valores del DNI del cliente.

El uso adicional de identificadores externos facilita el trasiego de datos unívoco entre sistemas. Cada registro de la tabla de clientes estaría unívocamente identificado con el ID. Cuando ese registro lo lee, lo consulta, o es volcado hacia el sistema A, este sistema podrá saber que ese registro es único fijándose en el campo ID (más allá de eso, este campo no tiene ningún otro significado para el sistema A), pero además podrá incorporarlo a sus procesos internos porque viaja unido al valor de ID_EXT_A, el cual sí que tiene significado dentro del sistema A.

Así, no existe ningún problema si en el sistema A aparece en algún momento la necesidad de un proceso que permita cambiar el valor del Código de Cliente de un registro. Puesto que éste simplemente es un identificador externo, en el modelo de datos comunes, el identificador único ID seguirá invariable para ese registro.

Una vez expuesta la problemática del tema de los identificadores, siguiendo en el escenario de replicación o compartición de datos comunes entre varios sistemas, nos encontraremos con el problema de traducciones o transformaciones de datos. Ya hemos hablado en parte de este tema, en el apartado de “idioma común”. Una vez reconocidos los campos o atributos, residentes en diferentes sistemas, pero que representan la misma información, es muy probable que sea necesario aplicar algún tipo de transformación del dato para poder volcarlo de un sistema a otro. Cuando trabajamos con sistemas que ya existían previamente, y pretendemos integrarlos entre sí, dentro del mismo mapa de sistemas, intercambiando datos entre ellos, será necesario resolver este problema de traducciones de datos.

A veces, la traducción será simplemente un cambio de formato. Podría ser por ejemplo, completar con ceros a la izquierda un determinado valor numérico, hasta completar una cierta cantidad de dígitos. O cambiar los valores de un dato que en un sistema se encuentra como “Si”/ “No”, y en otro se encuentran como “S”/ “N”, o como “True”/ “False”. O cambiar el formato de un dato de tipo fecha u hora.

Otras veces la traducción puede ser más compleja. Podríamos tener casos en los que el valor de un cierto campo en el sistema destino, depende de la combinación de valores de varios campos del sistema origen. Por ejemplo, el sistema origen podría tener inventariado, en campos separados, por

un lado el Modelo de un equipo (valores posibles: DSLAM, Switch, etc.), y por otro lado el Fabricante (valores posibles: ALLU, Ericsson, etc.), mientras que el sistema destino podría tener ambas informaciones mezcladas en un solo campo, teniendo ese campo acrónimos como valores posibles (DS-ALLU, Sw-Eric, etc.). Aunque pueda parecer extraño, es muy normal encontrar situaciones de este tipo en los escenarios de integración de sistemas, ya que es muy habitual encontrar que, cuando se diseña un sistema, se piensa más en solucionar de la manera más fácil posible el problema para el que está destinado, que en facilitar la vida para una hipotética futura integración con otro sistema.

En definitiva, podríamos encontrarnos con reglas de traducción de valores bastante complejas, con la consiguiente carga computacional que añadirán a los volcados periódicos. Es necesario revisar al máximo dichas reglas, quedarse sólo con las que sean estrictamente necesarias, y optimizarlas para no comprometer el tiempo de ejecución de cada volcado de inventario.

2.7.6. Tablas de “catálogos” o “diccionarios”

Dentro de las bases de datos utilizadas en los modelos de datos relativos a redes de telecomunicación, son de especial relevancia las tablas que podríamos denominar Catálogos o Diccionarios de datos. Realmente, no es algo exclusivo de las redes de telecomunicación, sino que muchos otros modelos de datos también disponen habitualmente de tablas de catálogos.

Podríamos definir un catálogo como una tabla que guarda valores posibles y acotados de un cierto dato. Dicho de otro modo es un conjunto o colección de valores que puede tomar un cierto campo, el cual necesita estar catalogado dentro de nuestro sistema. Un claro ejemplo podría ser el catálogo con las provincias de un cierto país; los valores posibles de las provincias son fijos y están catalogados. Cualquier sistema que tenga un campo de tipo “provincia” estará usando uno de los valores de dicho catálogo.

Cuando se diseña un sistema es muy útil, o más bien yo diría imprescindible, utilizar tablas de catálogos. Lo que conseguiremos con esto será independizar el dato que queremos almacenar en una cierta tabla, del nombre concreto que tenga ese dato. Veámoslo con un ejemplo. Si tenemos una tabla de Clientes, y un atributo de cada cliente es la Provincia en la que tiene su domicilio, en lugar de almacenar el valor de cada provincia (con todas sus letras) en la tabla de Clientes, lo que almacenaremos será la clave externa (identificador) del registro correspondiente a esa provincia, dentro de la tabla del Catálogo de Provincias.

La utilidad de una tabla de Catálogo es doble. Por un lado, al estar en una tabla propia, permite que los datos catalogados posean atributos adicionales. Por ejemplo, un catálogo de provincias, además de tener un campo para el nombre completo de la provincia, podría tener un campo para almacenar su abreviatura, y quizá otro campo para almacenar su población. Por otro lado independiza el resto de tablas del modelo en el que use el dato del catálogo. Así, podría cambiar la abreviatura con la que se conoce a una provincia sin afectar al resto de tablas en las que se use el dato de provincia.

Ejemplos de Catálogos que podemos encontrar en un modelo de datos de un sistema de gestión de una red de telecomunicación:

- Tipos de Equipos.

- Tipos de Tarjetas.
- Tipos de Puertos.
- Tipos de Clientes.
- Tipos de Servicios.
- Velocidades de transmisión
- Fabricantes de Equipos.
- Tipos de Emplazamientos
- Emplazamientos.
- Barrios.
- Provincias.
- Naciones.
- etc.

Como mínimo en la definición de una tabla de Catálogos de un cierto dato deberían existir los siguientes campos:

- Identificador único. Es la clave de la tabla. Normalmente es un número secuencial. Cada registro tendrá un identificador único que a su vez hará de clave externa en el resto de tablas del modelo en las que se use un dato de este catálogo. Es decir, cuando en otra tabla se quiere almacenar un valor de este catálogo, lo que se debe almacenar realmente es el valor de este identificador, para así poder independizar esa tabla de cualquier modificación en atributos de este registro del catálogo.
- Código. En este campo almacenaríamos un código corto o abreviatura del valor que se almacena en este registro del catálogo. Si por ejemplo lo que estamos almacenando son provincias, aquí podríamos almacenar su abreviatura: “M” para Madrid, “VA” para Valladolid, etc.). Si estamos almacenando nombres de Fabricantes de Equipos, podríamos tener “E” para Ericsson, “ALLU” para Alcatel-Lucent, etc. Estos códigos cortos son muy útiles para presentarlos en informes, listados o interfaces de usuario. Siempre existirá un sitio en nuestro sistema en el que será necesario presentar una información “compactada” de un cierto dato, y ahí es donde tienen utilidad los códigos cortos.
- Nombre. Es el nombre completo del dato que estamos almacenando, con todas sus letras. Para el ejemplo de las provincias los valores serían: “Madrid”, “Valladolid”, etc.
- Descripción. Descripción textual explicativa del dato almacenado. No siempre es necesario disponer de una descripción, pero en la mayoría de los casos tiene utilidad. Por ejemplo para mostrar un texto de ayuda en una cierta interfaz de usuario, cuando se muestran los valores posibles con los que se puede rellenar un cierto campo. El hecho de que la descripción resida en la tabla de catálogo dotará a nuestro sistema de gran flexibilidad. Podremos cambiar la descripción de un elemento, en un momento dado, solamente actualizando el catálogo, con lo que cualquier parte de la interfaz de usuario, o cualquier informe que muestre esta descripción, accediendo directamente al catálogo, quedará automáticamente actualizado.

Ejemplo de Catálogo de Tipos de Equipos:

ID	CÓDIGO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
0001	DS	DSLAM	Multiplexor de acceso a la línea digital de abonado
0002	2a8	Multiplexor 2 a 8	Multiplexor JDP de 2 a 8 Mbit/s
0003	ERX	ERX	Enrutador conmutador de borde
etc.			

Las tablas de catálogos son muy sensibles ya que poseen datos clave que se referencian desde muchas otras tablas del sistema. Por tanto en un escenario de integración de sistemas hay que prestarles especial atención. Si tenemos que enfrentarnos a un problema de volcado y replicación de datos desde un sistema a otro, deberemos empezar identificando las tablas de catálogos, pues deben ser las primeras cuya problemática de volcado se debe solucionar. De hecho, lo ideal es que los valores de los catálogos de los sistemas implicados en una dinámica de replicación de datos, sean los mismos. Esto, evidentemente, no suele ocurrir, así que necesitaremos también aplicar traducciones a los valores de los catálogos de ambos sistemas.

2.7.7. Copias de seguridad

No hay nunca que descuidar este aspecto, pues es lo que nos salvará ante catástrofes inesperadas. Es necesario tener siempre una buena política de copias de seguridad para poder restaurar el estado de nuestra base de datos ante algún imprevisto. Las copias deben cumplir, al menos las siguientes características:

- Estar programadas de forma automática. Aunque también deben permitir una ejecución bajo demanda.
- Estar físicamente (geográficamente) separadas. De nada nos vale tener dos copias en el mismo edificio ante un incendio o un accidente similar.

Actualmente existe *software* de base de datos que implemetan replicación en tiempo real, facilitando mucho la tarea de copias de seguridad y redundancia ante fallos.

2.8. Tiempo de desarrollo

Cada vez más, la implementación de grandes sistemas de telecomunicación en las empresas tiene que hacerse lo más rápido posible. Los nuevos servicios de telecomunicación aparecen muy rápido, y la presión de la competencia hace que sea crítico minimizar el tiempo que se tarda en sacar al mercado cada nuevo servicio. También aparecen rápido nuevos equipos de red, que realizan las tareas para las que están diseñados mucho más rápido que otros equipos antiguos, y por tanto surge la necesidad de integrarlos lo más pronto posible dentro de los sistemas de gestión que tenga nuestra compañía Operadora.

Esta gran dinámica que existe en el mundo de la telecomunicación obliga a los sistemas de gestión a tener que estar continuamente adaptándose. Esto es una diferencia con otros sectores, como por ejemplo, la Banca, en la que sí es posible que vayan apareciendo nuevos productos financieros, pero en el fondo los sistemas de gestión, simplificándolo mucho, suelen tener una gran componente de base de datos y lo único que hay que cambiar es el modelo de datos para acomodar esos nuevos productos.

¿Qué significa esto? Pues que la época de los proyectos de desarrollo faraónicos, planificados con un horizonte de plazo de desarrollo de varios años, ha acabado. Ahora mismo, los proyectos de desarrollo de sistemas de gestión deben ser proyectos a muy corto plazo, con una rápida puesta en producción, de manera que satisfagan las demandas cambiantes y variables que van apareciendo.

Si el desarrollo no llega a tiempo, y empieza a demorarse su puesta en producción, debido a fallos que no acaban de solucionarse, ya no servirá para nada. Es muy probable que la competencia nos haya ganado la partida y esté captando los clientes de ese nuevo servicio o producto, que nuestra Operadora no ha podido captar.

Evidentemente no es estrictamente necesario un completo sistema de gestión para poder vender al cliente final un nuevo servicio de telecomunicación. Siempre pueden adoptarse soluciones de contingencia, aumentando la cantidad de acciones o actividades manuales en los procesos de gestión. Así, en lugar de tener un sistema automático que reciba la petición comercial de provisión del servicio y lleve a cabo su activación en los elementos de red, podríamos tener un equipo humano de técnicos, que reciban las solicitudes de provisión con todos los datos y que sean ellos los que actúen de activadores manuales. Para ello podrían entrar directamente en las consolas de los equipos para ejecutar la secuencia de comandos de activación necesarios para cada provisión. Y luego, los mismos técnicos, podrían registrar mediante algún procedimiento asistido, la información de los servicios provisionados a los clientes, en el inventario del sistema.

Soluciones de contingencia como las explicadas aquí pueden tener su utilidad cuando la previsión de demanda de un nuevo servicio no sea muy grande. Pero si no es así, y la previsión es que el servicio va a ser muy demandado, la capacidad de procesamiento de órdenes de provisión con un método manual es muy pequeña comparada con un sistema automático de gestión.

Un ejemplo actual de nuevos servicios y nuevas redes lo constituye el despliegue de las redes de acceso de banda ancha con tecnología GPON (*Gigabit-capable Passive Optical Network*). Todas las operadoras, a lo largo de todo el mundo, están desplegando estas redes pues permiten la posibilidad de llevar nuevos servicios de banda ancha a los hogares, con velocidades binarias muy superiores a las actuales redes de acceso. El despliegue de estas redes es estratégico pues son la puerta para servicios por los cuales las operadoras van a poder ingresar grandes cantidades de dinero en el futuro cercano. Los clientes demandan cada vez más mayores velocidades de transmisión, y eso es lo que aportan estas redes ópticas. El despliegue de la tecnología GPON supone nuevos elementos de red que deben ser gestionados, lo cual significa:

- Adaptar los modelos de datos de los inventarios para dar cabida a estos nuevos equipos.
- Cambiar las funcionalidades de supervisión para poder captar sus nuevas alarmas o las nuevas medidas que proporcionen.
- Nuevos comando de activación para conseguir provisionar en ellos los nuevos servicios.

- Adaptación de procesos a las particularidades de gestión que tengan.
- Etc.

Dicho en pocas palabras, todo esto supone que deben ser integrados en los sistemas de gestión de la operadora. Esto significa cambiar los sistemas, y cambiarlos rápido pues de lo contrario las empresas de la competencia se quedarán con nuestros clientes potenciales.

Lidiar con este entorno dinámico y cambiante obliga a prestar una especial atención a los diseños de los sistemas. Hoy en día cobra una especial importancia que el diseño de un sistema no se haga solamente pensando en las funcionalidades actuales que de él se requieren, sino que el diseñador se debe proyectar más allá, con una previsión de las posibles funcionalidades futuras y del volumen futuro de información que deba manejar.

Los diseños deben ser flexibles y adaptables. La aparición de un nuevo servicio o de un nuevo elemento de red no debe suponer un gran tiempo de desarrollo para integrarlo en el sistema, por todas las razones que se han comentado anteriormente. La base de datos y las funcionalidades que operan sobre ella, deben haber sido pensadas para esas posibles extensiones.

El sistema también debe ser escalable, es decir, tener la capacidad de poder ser adaptado de forma rápida a un aumento del volumen de los datos o de las operaciones que deba soportar. Aunque en la primera implantación del sistema, recién desarrollado, no tuviera unos grandes requisitos de volumen de datos o de transacciones, debe haberse pensado en el futuro, y debería ser fácilmente expandible mediante la adición de módulos hardware o adquiriendo más licencias de los productos de software comercial que se usen (si ese el caso). El diseño debe huir de los “cuello de botella” para permitir esta escalabilidad. Si no se ha hecho con cuidado podríamos encontrarnos con una tabla de la base de datos que, por ejemplo, sea muy consultada y no está suficientemente dimensionada, o que posea un dato que es frecuentemente modificado y a su vez la tabla sea muy accedida para consultas, o tener consultas que recopilen información de varias tablas, y que por el hecho de no estar optimizadas tengan un tiempo de ejecución demasiado lento.

Es inevitable que, ante la aparición de nuevos requisitos para el sistema, debamos replantear u optimizar algunas cosas en el mismo, pero el objetivo es que estas sean las mínimas posibles. Aunque no exista solicitud o necesidad de nuevos requisitos, es una buena práctica el no dejar de optimar el sistema, repasando sus puntos débiles y mejorando continuamente sus prestaciones. Así cuando llegue la necesidad real de una nueva funcionalidad, el sistema se encontrará mejor preparado, y se podrá dar una respuesta rápida al cliente (entendiendo por cliente, la persona o departamento de la que surge la necesidad del nuevo requisito).

2.9. Las decisiones en el entorno empresarial

Las empresas, como todo el mundo sabe, tienen como objetivo ganar dinero y perdurar en el tiempo. Siempre buscan el máximo beneficio, año tras año. Cualquier decisión de inversión que se deba tomar para implementar un nuevo sistema de gestión debe estar suficientemente justificada. El coste de implementación del sistema deber ser ampliamente amortizado por los beneficios y el ahorro de costes de operación que reportará su uso.

El problema es que tanto estos costes como los potenciales ahorros siempre son estimativos. Se puede elaborar un presupuesto sobre el coste final del desarrollo de un sistema, pero ese presupuesto

siempre será aproximado. Al final siempre ocurren desviaciones sobre lo planificado o situaciones imprevistas que incrementan el coste. Aunque lo más habitual es que se reciban redefiniciones de las especificaciones o nuevos requisitos. Durante el tiempo que dura la implementación de un sistema, las necesidades del cliente (la Operadora) que encargó el sistema, van evolucionando. Y es por tanto normal que aparezcan nuevos requisitos, y que además el cliente solicite que el desarrollo los contemple.

Y el ahorro de costes también será una estimación, basada en el cálculo del esfuerzo que conlleva acometer las tareas que va a implementar el nuevo sistema, mediante otros medios diferentes. Normalmente un nuevo sistema suele proveer una automatización de un proceso o procedimiento que tenga muchas tareas manuales. Desde esa perspectiva, lo que habría que evaluar para calcular el ahorro que supone el sistema, es el coste de dedicar personal a realizar todas esas tareas manuales.

Las estimaciones económicas que se hacen antes de implementar un sistema, deberían comprobarse también a posteriori, una vez desarrollado el sistema, y una vez puesto en producción y funcionando por un tiempo. Son necesarias métricas adecuadas para demostrar que las decisiones tomadas fueron acertadas. Pero, en cualquier caso, estos estudios posteriores sólo sirven para corroborar lo acertado o fallido de una decisión previa, y por tanto para premiar o castigar a la persona que decidió. La decisión ya se tomó al principio del proceso.

El sentido común nos dice que una decisión siempre se debe tomar en base a documentación. Pero la realidad no es así. Las decisiones de inversión las toman seres humanos. A ellos es a quien hay que convencer. A veces será más fácil vender un algoritmo más simple, pero más entendible por el decisor, que un algoritmo inicialmente más complejo y potente pero con un funcionamiento más difícil de explicar.

2.10. Aplicación a otros entornos similares

Gran parte de lo descrito en este trabajo es aplicable a otras empresas cuyo negocio no se centra en los servicios de telecomunicación. Estaríamos hablando de compañías que poseen algún tipo de red física de distribución, y en las que algún fallo de dicha red produce una afectación en los clientes finales de la compañía.

Como ejemplo podríamos citar a empresas de distribución de energía eléctrica. Estas empresas deben disponer de toda una infraestructura de red física que posibilita el transporte de la energía desde los puntos de generación (centrales nucleares, eólicas, solares, hidráulicas, etc.), hasta los puntos de consumo (industrias, hogares particulares, etc.). En toda esa red se sitúan elementos intermedios de diferentes tipos (subestaciones, transformadores, etc.), existen tendidos eléctricos de alta, media y baja tensión, cableados subterráneos o aéreos, en definitiva y para lo que nos interesa, multitud y variedad de puntos posibles de fallo.

Figura 27: Red de distribución eléctrica

Como toda gran red, y para garantizar los niveles de calidad de servicio que contratan los clientes, se necesita una supervisión. Las compañías eléctricas deben tener sus propios sistemas de supervisión que controlen y avisen (mediante alarmas o procedimientos similares) de fallos en la red (rotura de cables, variaciones de tensión o corriente, sobrecargas, incendios, etc.). Deberá de existir uno o varios centros de control desde los que se supervise el correcto funcionamiento de la red. Y cada vez que se produzca un fallo, al igual que hemos descrito para una compañía operadora de telecomunicación, lo óptimo es averiguar el grado de afectación que está produciendo en los clientes para valorar la importancia relativa del mismo. Es de sentido común, que la prioridad de actuación, ante la presencia de varios fallos en la red, es directamente proporcional a la importancia que tenga el fallo para el conjunto de los clientes. Aquí, como veremos más adelante, será necesario definir unas métricas para la aplicación de algoritmos de decisión, ya que no todos los clientes son igual de importantes: será más importante dejar sin energía eléctrica una subestación que alimenta una línea férrea, que dejar sin energía a un domicilio particular, pero cabría preguntarse cuál debe ser la cantidad de domicilios particulares sin energía para que todos juntos importen más que el fallo en dicha subestación.

Toda la explicación anterior también es aplicable, por ejemplo, a compañías que se dediquen al negocio de la distribución de gas o de agua. En estos casos, además de calcular la afectación a los clientes por el corte del suministro, hay que tener en cuenta la afectación a la población en general (sean o no clientes) por los efectos que puede tener una rotura en sus tuberías de distribución. Una rotura de una tubería de agua puede provocar daños por inundaciones (evidentemente, dependiendo del tamaño) y una rotura de una canalización de gas puede producir intoxicaciones y riesgo de incendios y explosiones. Aquí los sistemas de supervisión deben ser, si cabe, aún mejores, por los efectos dañinos que acabamos de mencionar. Y adicionalmente se debería contar con elementos de seguridad que permitan cortar en un tiempo muy breve, el suministro en una determinada zona y así evitar daños mayores. Resumiendo, podríamos decir que en estos ejemplos, la priorización de las acciones de restauración de los fallos en la red debe tener en cuenta adicionalmente los potenciales daños civiles que pueden producirse.

Otro ejemplo, quizá más rebuscado, podría ser una red de ferrocarriles o de carreteras. En estos casos igualmente se necesitan sistemas de supervisión que avisen de problemas en las redes (accidentes, carriles cortados, movimientos de tierra, inundaciones, etc.). Pero, a diferencia de los casos anteriores, tomar la decisión de qué fallos son los más importantes no necesita de algoritmos muy complejos. Todo el mundo tiene claras cuáles son las vías principales de comunicación en cualquiera

de estas redes. Además de que, por cantidad de elementos, son redes mucho menos extensas que las anteriormente comentadas. Y adicionalmente, las posibilidades de actuación son mucho menores en caso de encontrarnos con incidentes: si se bloquea una línea férrea principal no suele haber mucha más opción que proporcionar transporte alternativo por carretera y esperar a que la línea pueda ser desbloqueada por los operarios. De cualquier manera, en estos casos, igualmente se están aplicando, de manera implícita, criterios de decisión a la hora de destinar medios a la reparación de las incidencias (aunque no se necesite del apoyo de un sistema informático para ello).

3. TEORÍA DE LA DECISIÓN

La Teoría Matemática de la Decisión, cuya panorámica puede encontrarse en [42] [43] [44] [48], es una área de estudio multidisciplinar, que se centra en el análisis del comportamiento de aquellos que toman las decisiones, de la forma en la que se toman esas decisiones, así como las condiciones por las que deben ser tomadas las decisiones óptimas. En definitiva se encarga de los procesos de toma de decisión desde una perspectiva racional.

El problema de la Decisión, motivado por la ambigüedad de las opciones que a uno se le plantean, es tan antiguo como la vida misma. Podemos afirmar que todos los seres vivos, aún los más simples, se enfrentan con problemas de decisión. Y por extensión, los sistemas informáticos que el hombre diseña, intentando a veces imitar el comportamiento de un cerebro animal, necesitan ser programados con reglas que les permitan tomar las decisiones oportunas ante los problemas para los que se les ha diseñado.

De forma genérica, un proceso de decisión presenta las siguientes características principales:

- Existe más de una forma posible de actuar (al menos dos), a las cuales se las denomina **alternativas**, excluyentes entre sí, de manera que la actuación según una de ellas imposibilita cualquiera de las restantes.
- Existe un conjunto de datos o de informaciones que serán los únicos datos de entrada tomados en cuenta por el proceso de decisión.
- El proceso de decisión consiste en elegir una alternativa.
- La elección de la alternativa ha de realizarse de modo que cumpla un determinado fin, normalmente maximizar algún tipo de función de “beneficio”.
- En un problema de decisión debemos diferenciar claramente dos actores: el **analista** y el **decisor**. Debe ser el analista el ayudante del decisor en el camino para conseguir tomar su mejor elección. El papel del analista es estudiar el entorno del problema e interrogar al decisor para conseguir plasmar todo el conocimiento de éste último, en los atributos asignables del algoritmo de decisión elegido para un cierto problema.

Los estudios científicos sobre “decisión” han sido un sector sobre el que cada vez más investigadores han demostrado su interés, sobre todo en las últimas décadas. En particular, el análisis de la decisión con criterios múltiples (multicriterio), se ha extendido y aplicado en muchos campos distintos, como por ejemplo desde la selección de proveedores de logística [38], como la selección del mejor trazado para el tren de alta velocidad [39] [57], o problemas de análisis financiero [40].

Si en un problema de decisión sólo tuviéramos un criterio la solución sería bastante simple. Por ejemplo si quiero comprar un coche y mi único criterio es el precio más bajo, la elección será bastante fácil de tomar. Sin embargo lo habitual es que existan muchos criterios (en nuestro ejemplo: la potencia del coche, el consumo, el tamaño) y que además los criterios tengan un efecto contrapuesto en la decisión (a más potencia más precio, a más tamaño más consumo, etc.).

Desde el punto de vista humano también hay teorías que demuestran que el exceso de información muchas veces no sirve para decidir mejor. El cerebro humano no es capaz de procesar una gran cantidad de estímulos contrapuestos, y muchas veces toma decisiones de manera impulsiva o basada

sólo en unos pocos datos relativos al problema de decisión. E incluso algunos estudios de actividad cerebral sugieren que nos somos tan libres para decidir como suponemos. Muchas decisiones que nosotros creemos que han sido tomadas desde nuestra mente consciente, realmente se deben a una orden de nuestro subconsciente, que se adelanta a lo que nosotros “creemos” que queremos hacer.

En cuanto a la formalización matemática de la teoría de la decisión, existen numerosos grupos de investigación dedicados a estas tareas, cuyo trabajo ha dado lugar a la aparición de numerosas metodologías conocidas como “Ayuda a la Decisión Multicriterio”.

La Decisión Multicriterio puede dividirse en dos grandes grupos atendiendo a la cantidad de alternativas manejadas:

- Decisión Multicriterio Continuo: en la que el conjunto de soluciones posibles es infinito, y por tanto desconocido de antemano.
- Decisión Multicriterio Discreto: en la que el número de alternativas a considerar por el decisor es finito, y no muy elevado. Las alternativas por tanto son conocidas previamente.

3.1. Decisión Multicriterio Continuo

Aunque en este trabajo no se han aplicado métodos de este tipo, dada la complejidad de plantear un modelado coherente con el problema que se pretende resolver, se realiza aquí una breve exposición de estos métodos.

Se aplican métodos de decisión multicriterio continua cuando se tiene un conjunto continuo de alternativas. Los métodos existentes básicamente se clasifican en:

- Programación multiobjetivo (MOP, *Multiobjective Programming*). Ante una serie de múltiples objetivos a optimizar, y satisfaciendo una serie de restricciones, lo que pretende es establecer el conjunto de soluciones eficientes o pareto óptimas. Las principales técnicas son:
 - Método de las ponderaciones.
 - Método de las restricciones.
 - Método NISE (*noninferior set estimation*).
 - Método simplex multicriterio.
- Programación compromiso (CP, *Compromise Programming*). Este método introduce las preferencias del decisor. Utiliza el punto ideal como punto de referencia por el centro decisor. El centro decisor define la solución óptima o mejor solución compromiso, como la solución eficiente más próxima al punto ideal. Y para medir esa proximidad se utiliza una función de distancia (la cual debe ser minimizada). Un ejemplo de su utilización podemos encontrarlo en este trabajo de Antón, J.M., Grau, J. B. y Sánchez, E.M [40].
- Programación por Metas (GP, *Goal Programming*). Se basa en la denominada lógica satisfaciente enunciada por Simon: “en los contextos actuales de decisión (información incompleta, recursos limitados, conflictos de intereses, ...) el decisor más que optimizar unas funciones objetivo intenta que una serie de metas se aproximen lo más posible a unos niveles de aspiración prefijados.” Según Romero [52], que es un autor destacado en este campo, podemos decir que la “PM constituye un marco analítico diseñado para analizar problemas

complejos de análisis de la decisión, en los que el centro decisor ha asignado niveles de aspiración a todos los atributos relevantes para el problema en cuestión. Consecuentemente con este planteamiento el centro decisor está interesado en minimizar de una manera u otra la falta de logro de las correspondientes metas; i.e., de esta manera se intenta obtener una solución satisfactoria y suficiente (satisfaciente)”.

3.2. Decisión Multicriterio Discreto

En lo sucesivo, este trabajo se centra sobre los métodos discretos. Dentro de un problema de Decisión Multicriterio Discreto, aparte de las alternativas, existirá un conjunto finito y discreto de Criterios [53]. Los criterios son las reglas o condiciones sobre la cuales van a ser evaluadas las alternativas.

Figura 28: Paradigma del problema de Decisión Multicriterio Discreto

El paradigma anterior debe gran parte de su éxito a su sencillez de planteamiento. Como se ha introducido de forma resumida, debemos partir de una enumeración de las **alternativas** (o soluciones candidatas) que constituirán un conjunto $\{A_i\}$ ($i=1, 2, \dots, m$). Las alternativas deben ser completamente disjuntas y exhaustivas, es decir, no cabe contemplar la existencia de alternativas intermedias. De hecho, si nos damos cuenta de que existe una de esas alternativas intermedias, lo que debemos hacer es incorporarla inmediatamente, con carácter propio, a la lista de alternativas que estamos manejando en nuestro problema. En definitiva, el conjunto $\{A_i\}$ es discreto y universal.

Por otro lado, los **criterios** (o condicionantes, o características), sobre los cuales se basará el proceso de decisión, también forman un conjunto discreto $\{C_j\}$ ($j=1, 2, \dots, n$). Hay que ser muy cuidadoso con la elección y designación de los criterios, pues cabe la posibilidad de que exista solapamiento o subordinación entre ellos, efecto que debe ser evitado si queremos que nuestro problema quede correctamente formulado en los términos que la teoría multicriterio exige.

Para completar el esquema nos resta hablar de los conceptos que definen la relación entre criterios y alternativas. Por un lado tenemos el llamado **vector de pesos** $\{W_j\}$ ($j=1, 2, \dots, n$). Existe un peso para cada uno de los criterios. El vector de pesos representa la estructura de preferencia del decisor en cuanto a la importancia relativa de unos criterios respecto a otros. Asignar los pesos es una decisión importante ya que es un dato que influye en todo el resto del proceso.

Por último tenemos las evaluaciones r_{ij} de cada alternativa i respecto a cada criterio j . El conjunto ordenado de todas estas evaluaciones constituye la denominada **matriz de decisión**, o matriz decisional.

Independientemente de cómo se midan las evaluaciones y los pesos, el objetivo general de los métodos multicriterio discretos es el de seleccionar la “mejor” alternativa. Por la propia definición y estructura de estos métodos tenemos que descartar el hecho de que vayamos a encontrar una solución óptima. Debemos contentarnos con ese “mejor” tomado entre comillas, que viene a significar que su definición está abierta a diversas interpretaciones más o menos racionales.

3.2.1. Normalización de valores

Las medidas de las evaluaciones r_{ij} normalmente se encuentran en diferentes escalas, incompatibles a primera vista. Ocurre que hay métodos multicriterio discretos específicamente adaptados a la escala en la que se tengan las evaluaciones. Así tenemos por un lado los métodos cualitativos que son los que están adaptados a escalas simplemente ordinales. Evidentemente estos métodos tienen ventajas prácticas en cuanto a la poca exigencia de información por parte del decisor. Otros métodos requieren una escala cardinal.

Relacionado con lo anterior, algunos métodos especifican que las evaluaciones r_{ij} de una alternativa concreta, correspondientes a cada uno de los criterios, sean comparables no sólo en tipo de escala, sino en magnitud, unidades, posición del cero, dispersión de valores, etc. Para lograr esto es necesario llevar a cabo una actividad de normalización de los valores de las evaluaciones r_{ij} . Existen diferentes maneras de normalizar, como un porcentaje del valor máximo, como un porcentaje del rango entre valor máximo y mínimo, etc. Cada método impone su forma de normalización.

3.2.2. Asignación de Pesos

Atendiendo a un modelo de pesos de tipo no compensatorio, podríamos decir que los pesos representan simplemente prioridades del decisor, y que basta un escala ordinal para medirlos (o hasta incluso podría bastar un semiorden para ello). Puesto que los pesos representan una cuantificación de la estructura de preferencia del decisor, es necesario establecer la forma en la que se va asignar su valor, ya que los condicionantes de la mente humana y sus inercias psicológicas pueden producir incongruencias y contradicciones.

Un procedimiento clásico de asignación de pesos es el descrito en Churchman et. al. (1957), mejorado por Eckenrode (1965) y Knoll (1978), llamado método de las utilidades relativas. Consiste en partir de unas estimaciones iniciales, provisionales, y llevar a cabo un proceso de ajuste por medio de comparaciones binarias entre subgrupos de criterios.

En esta misma línea de estimación directa de pesos se encuentran los diferentes métodos de los modelos de Utilidad Multiatributo, como por ejemplo el del valor medio (*midvalue*), analizados en detalle por Fishburn (1970) y Keeney y Raiffa (1976).

Otro grupo de métodos están basados en lo que podríamos llamar procedimientos por aproximación, del cual es un destacado representante el conocido AHP (Analytic Hierarchy Process) de Saaty (1977, 1980, 1985). Éste está basado en el cálculo del autovector dominante de una matriz de decisión cuyos valores se han asignado de acuerdo a una escala normalizada entre 1 (igual de importante) y 9 (mucho más importante) que mide la importancia subjetiva de un criterio respecto a otro.

3.2.3. Panorámica de los métodos de Decisión Multicriterio Discreto

A la hora de clasificar estos métodos muchos autores se basan, entre otros, en los siguientes aspectos:

- Las dimensiones de la matriz de decisión.
- La forma de medir las evaluaciones y los pesos (cardinal, ordinal, etc.).
- Las exigencias de información que se plantean al decisor.
- El carácter compensatorio o no de los criterios.
- El tipo de resultado que ofrecen en cuanto a la elección de la mejor alternativa y si dejan o no el resto de alternativas ordenadas por preferencia.

Sin embargo, para obtener una mejor visión global de todos ellos los clasificaremos a continuación basándonos en la similitud de estructura y de operativa.

Lexicográficos

Tienen un esquema básico muy simple. Se toma en primer lugar el criterio con mayor peso. Según su vector de evaluaciones se elige la mejor alternativa. Si se encuentra un empate, se usa para desempatar el segundo criterio con mayor peso, y así de forma sucesiva. Tan sólo requiere una ordenación de los criterios, y un preorden, o incluso un semiorden en las alternativas.

Tiene como ventaja que no requiere comparabilidad intercriterios ya que tiene un carácter no compensatorio. Como inconveniente tenemos que no utiliza toda la información disponible.

Como fundamento teórico tiene los estudios de Georgescu-Roegen (1954), Debreu (1960) y Fishburn (1974).

Ponderación Lineal

Su esquema básico se fundamenta en construir una función de valor para cada alternativa A_i :

$$U(A_i) = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij}$$

Una vez que se acepta esta formulación lineal, implicando independencia y compensaciones entre los criterios, el problema se traslada directamente a los pesos w_j , es decir, a una adecuada estimación de los mismos en una escala cardinal.

Es un método típicamente compensatorio que necesita una normalización previa de las evaluaciones. Es sencillo y muy intuitivo, pero hay que prestar especial atención para no utilizarlo incorrectamente.

Utilidad Multiatributo

Los métodos de utilidad multiatributo (UMA) son una generalización de los de ponderación lineal en varios aspectos. Por un lado permiten funciones de valor más sofisticadas. Por otro incorporan la posibilidad de valorar el riesgo y la incertidumbre.

Su objetivo, como siempre, es construir una función de utilidad $U(A_i)$ para cada alternativa teniendo en cuenta las evaluaciones de los criterios para dicha alternativa. Y el mayor o menor grado de independencia de los criterios permitirá reducir dicho problema a la construcción de funciones de utilidad univariantes $U_j(r_{ij})$, mucho más sencillas, las cuales luego serán debidamente agregadas. El caso más sencillo es el denominado aditivo que es muy similar al método de ponderación lineal.

$$U(A_i) = \sum_{j=1}^n k_j U_j(r_{ij})$$

Estos métodos tienen sus propias condiciones de construcción de las funciones de utilidad, entrando incluso en juego la incertidumbre a base de preguntas al decisor.

Sus referencias básicas son Fishburn (1970) y Keeney y Raiffa (1976).

Asignación Lineal

Son métodos de tipo compensatorio y requieren de un preorden (por cada criterio) como evaluación de las alternativas y unos pesos en escala cardinal. Podrían clasificarse por tanto como métodos semicualitativos.

En el fondo son métodos de ponderación lineal de evaluaciones ordinales.

Su forma de utilización se basa en construir una matriz ($m \times m$) en la que cada elemento e_{ik} es la suma de los pesos w_j de los criterios j en que la alternativa A_i aparece ordenada en la posición k . Y si hay empates por la posición en algún criterio, dicho criterio se desdobra en dos, cada uno con las dos posiciones intercambiadas y la mitad del peso original. Si los pesos están normalizados a suma unidad la matriz resultante tiene interesantes propiedades (todas sus filas y columnas sumarán 1). Cada coeficiente e_{ik} mide la contribución de A_i a la ordenación global si A_i fuese asignada a la posición k . Cuanto mayor es e_{ik} mayor concordancia habrá en dicha asignación.

Estos métodos se basan en los trabajos de Bernardo y Blin (1977-78)

Concordancia

Aquí el concepto fundamental es el de las comparaciones binarias entre pares de alternativas. Del decisor se necesita obtener tan sólo un preorden en las evaluaciones por cada criterio, y unos pesos en escala cardinal (o incluso simplemente ordinal). Son métodos adecuados cuando lo único que se busca es obtener un subconjunto de alternativas aceptables.

Lo básico en estos métodos es construir un coeficiente de concordancia c_{ik} para cada alternativa i , k . Dicho coeficiente c_{ik} suele definirse como la suma de los pesos de los criterios en que la alternativa i es superior a la k , más la mitad de los pesos en los que ambas alternativas sean consideradas iguales. Así se obtiene la denominada matriz de concordancia ($m \times m$) que puede utilizarse de diferentes formas según las diversas variantes que presentan estos métodos:

- Calculando unos índices de evaluación global de cada alternativa i , y de esta manera una ordenación completa de las mismas.
- O bien transformándola en una matriz de disimilaridades, para luego utilizar métodos de distancia al ideal.
- O bien como información parcial para ser utilizada en los métodos de relaciones de superación.
- Etc.

El origen de estos métodos se encuentra en Benayoun (1966), siendo también muy utilizados y diversificados por los holandeses Nijkamp, Rietveld, Van Delft, etc. Son también una referencia para los métodos basados en relaciones de superación que son los expuestos en el siguiente apartado.

Relaciones de Superación

Los métodos de Decisión que incorporaron en sus análisis las denominadas “Relaciones de Superación” (*Outranking relationships*) tuvieron su origen en Francia y Bélgica. Nacieron de la mano de Bernard Roy y su equipo de colaboradores en 1966. La idea es comparar todas las alternativas que se presentan en el problema, por pares, sobre la base de dos medidas: la concordancia y la discordancia, que más adelante quedan explicadas. Los principales algoritmos que reflejan estas ideas son los métodos ELECTRE (Elimination et Choix Traduisant la Réalité), aunque también con posterioridad hicieron su aparición los métodos PROMETHEE (Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations), fruto del trabajo de los investigadores Jean P. Brans y Phillip Vincke, en 1985.

Gran parte del presente trabajo se centra en los métodos ELECTRE, y concretamente en la versión Electre I, que aunque no es la más reciente, es la única que considera los “criterios verdaderos” (true criteria).

Permutación

La idea básica es comparar cada permutación posible de alternativas (considerando la permutación como una ordenación de las alternativas, evidentemente) con la información ordinal que aporta la para cada criterio la matriz de decisión. Para cada permutación se calcula el denominado índice de evaluación según lo bien que concuerde con lo que proporcionan los datos. La permutación que tenga mayor índice será la vencedora.

Como ventaja tenemos la flexibilidad de cara al decisor (al ser un método cualitativo), y como inconveniente principal tenemos que su dificultad de cálculo crece con el número de alternativas de manera factorial ($m!$). Podríamos decir que es un método compensatorio pues la idea de

ponderación lineal está subyacente. Podríamos resumirlo como un exhaustivo método de concordancia ya que examina cada orden de preferencias del conjunto de todas las alternativas, en lugar de solamente realizar comparaciones binarias entre parejas de alternativas.

El origen del método lo encontramos en Paelinck (1976) con su denominado método QUALIFLEX.

Comparación de alternativas

En este caso lo que se construye, de forma indirecta, es el vector de pesos de los criterios, en lugar de requerirlo de forma previa.

El pionero de esta línea es el clásico LINMAP de Srinivasan y Shocker (1973) hoy todavía muy utilizado en las áreas de marketing. Este método se plantea minimizar la distancia euclídea ponderada a la alternativa ideal, determinando los pesos de manera que se minimice una medida de inconsistencia con las preferencias expresadas por el decisor, al comparar las alternativas de dos en dos. Cuantas más alternativas se comparen menor es la inconsistencia y mayor es la fiabilidad de los pesos que se obtienen. Podríamos decir que LINMAP es el inverso de ELECTRE: puesto que el primero genera pesos partiendo de un preorden parcial de las alternativas y el segundo hace lo contrario (a partir de unos pesos, genera un preorden de alternativas).

Zionts (1981) construyó su propia variante de este método, que también utiliza comparaciones binarias de alternativas globales, pero en forma interactiva y sin necesitar todas las comparaciones posibles. El método parte de unos pesos iniciales arbitrarios que generan una alternativa inicial óptima de referencia. Esa alternativa se ofrece al decisor para que la compare con otras alternativas próximas. Si cambia la alternativa de referencia se calculan los correspondientes nuevos pesos y el proceso se repite. Al final se conseguirá obtener una alternativa de referencia estable que será la solución del problema.

A partir de este método de Zionts se han desarrollado variantes más elaboradas, por ejemplo la de Korhonen (1986) o Jacquet-Lagreze y Siskos (1982).

Análisis multivariante

Aquí se engloban métodos cuyo objetivo es reducir la dimensionalidad de los criterios mediante técnicas de análisis multivariante.

Una familia es la que se apoya en el Multidimensional Scaling de Kruskal y Wish (1978). Aquí, partiendo de una matriz de disimilaridades de las alternativas puede conseguirse un mapa en dos dimensiones que sitúa a las alternativas en posiciones relativas entre sí, según las disimilaridades que las separan. Si a continuación se intenta situar sobre dicho mapa la alternativa ideal (utilizando por ejemplo LINMAP), la alternativa que quede más cercana a la ideal se puede considerar como la mejor.

Otra familia es la desarrollada por Stewart (1981) que utiliza el análisis factorial para reducir los n criterios del problema a un subconjunto reducido de, llamémoslos hipercriterios, que sean capaces de explicar un amplio porcentaje de la matriz de decisión.

3.2.4. Métodos ELECTRE

Todos los métodos ELECTRE construyen lo que se denomina “relación de superación” que representa las preferencias del decisor sobre el conjunto de alternativas, dada la información disponible. Es un modelo de decisión multicriterio que utiliza diversas funciones matemáticas para indicar el grado de dominancia o prevalencia de una alternativa respecto de otra. Al formar parte de la familia de los métodos de relaciones de superación estos algoritmos se basan en las comparaciones binarias entre alternativas asignando ponderaciones iniciales a los criterios de decisión, lo cual permite un posterior análisis de sensibilidad cuando se varían las citadas ponderaciones para aproximarlas al valor exacto, que a priori es desconocido. Todo esto puede completarse con un análisis de robustez, lo cual otorgará mayor fiabilidad al modelo. Las comparaciones se efectúan por pares de alternativas y bajo cada uno de los criterios de decisión, y a partir de ellas se obtiene el grado de “dominancia” o “superación” de una alternativa respecto de otra. El resultado es el ordenamiento del conjunto de alternativas.

La aproximación que hacen los métodos ELECTRE tiene su punto de partida en la intuitiva premisa de que el Decisor (Decision-Maker) sólo puede hacer comparaciones aproximadas de la idoneidad de cada alternativa. ELECTRE permite igualar, en cierto sentido, magnitudes que no son numéricamente iguales. Las relaciones de superación no tienen una base axiomática, sino que están basados en parámetros y en un algoritmo de decisión. Es necesario que el Decisor proporcione al Analista una clasificación de cada alternativa según cada uno de los criterios utilizados, y a partir de ahí el sistema de preferencia se diseña mediante una formulación matemática.

Los métodos ELECTRE han sido ampliamente utilizados en problemas de planificación y administración por varios gobiernos de países.

Estos métodos permiten un ordenamiento general de las alternativas, aún cuando puedan existir pares de alternativas que permanezcan incomparables debido a la falta de referencias suficientes para distinguir entre ellas. Además, son capaces de tratar al mismo tiempo con información tanto cualitativa como cuantitativa.

Actualmente hay seis versiones de esta familia de métodos, ELECTRE I, II, III, IV, Tri e Is [58] [59] [60] [61]. Tal y como se ha comentado anteriormente, estos métodos, en general, conllevan un análisis sistemático de las relaciones entre todos los pares posibles de alternativas, sobre la base de las evaluaciones que poseen las alternativas respecto de cada uno de los criterios. La metodología contempla la construcción de una relación de superación, la generación de índices de concordancia y discordancia (incluyendo la noción de importancia relativa para cada criterio) y un análisis de los resultados obtenidos de la evaluación completa de todas las relaciones de superación obtenidas.

En cada versión del método, las alternativas de decisión son evaluadas en términos de los criterios múltiples; siendo cada criterio una medida de las preferencias del decisor de acuerdo con algún punto de vista. La versión del modelo ELECTRE que se debe emplear depende, esencialmente, de los tipos de criterios involucrados. La definición de estos criterios es pues de una importancia y relevancia vital para la adecuada comprensión del método.

Las estructuras de preferencia, utilizadas por los métodos de relaciones de superación, recogen distinguos tipos de criterios, dependiendo de la complejidad de su formulación y de la naturaleza del problema de decisión. Así podemos distinguir entre:

- El criterio verdadero o real
- El semi-criterio
- El criterio de intervalo
- El pseudo criterio

La versión ELECTRE I, utiliza “criterios verdaderos”, por lo que en el presente trabajo se especificará este tipo de criterios con más precisión, para comprender mejor el funcionamiento de esta metodología.

Las últimas versiones del ELECTRE trabajan con pseudo-criterios incorporando así complejidad a las estructuras de preferencia. De esta forma se define con mayor profundidad el tratamiento de la incertidumbre al incorporar nuevos umbrales (preferencia, indiferencia y veto).

Criterio real o verdadero es la forma más sencilla de formular un criterio y se utiliza en aquellas estructuras de preferencia denominadas “tradicionales”. En ellas no deben determinarse umbrales y las diferencias entre las evaluaciones de los criterios se utilizan para decidir cuál es la alternativa preferida. La estructura de preferencia del ordenamiento resultante es un preorden completo.

En general, en un problema de decisión multicriterio, se dice que la alternativa ***a*** supera a la alternativa ***b*** si, dados el nivel de conocimiento de las preferencias que posee el decisor y la calidad de la información respecto de todos los criterios considerados para evaluar cada alternativa, existen argumentos suficientes a favor de considerar que la alternativa ***a*** es al menos tan buena como la alternativa ***b***, y no existen argumentos sólidos que indiquen lo contrario.

Cualquier estructura de preferencia o superación puede caracterizarse completamente mediante una relación de superación (***S***), que define las condiciones necesarias para que una alternativa ***a*** supere a otra ***b***. Así, la alternativa ***a*** supera (***S***) a la alternativa ***b*** si el decisor la prefiere (***P***) a la alternativa ***b*** o es indiferente (***I***) entre ambas. Formalmente se puede escribir de la forma:

$$a \ S \ b \Leftrightarrow a \ P \ b \ o \ a \ I \ b$$

En una estructura de preferencia “tradicional”, las preferencias del decisor satisfacen el modelo siguiente:

$$a \ P \ b \Leftrightarrow g(a) > g(b)$$

$$a \ I \ b \Leftrightarrow g(a) = g(b)$$

siendo ***a*** y ***b*** dos alternativas del conjunto ***A*** ($a, b \in A$), y ***g*** es la función de valor de uno de los criterios (que responderá en el fondo a una fórmula matemática impuesta por la definición que tenga ese criterio).

La relación de superación ***S*** se define como la unión de ***P*** e ***I***, es decir $S = P \cup I$

$$a \ S \ b \Leftrightarrow g(a) \geq g(b)$$

La relación de indiferencia ***I***, resulta tener una importante propiedad transitiva, es decir que:

Si ***a I b***, y ***b I c***, entonces ***a I c***

Esta estructura de preferencia se denomina preorden completo y cumple las propiedades reflexiva, transitiva y la completitud. Todas las alternativas tienen que ser ordenadas de la mejor a la peor, admitiendo empates o incomparabilidades entre alternativas del mismo rango. Si no existiesen empates, la relación podrá transformarse en un orden completo, satisfaciendo las propiedades reflexiva, antisimétrica, transitiva y la completitud.

3.2.5. Método ELECTRE I

La versión objeto de este trabajo, el método ELECTRE I, fue la primera versión de toda la familia ELECTRE, presentada por Bernard Roy en 1968, para la formulación y resolución de problemas de decisión con criterios múltiples [58].

En este método el objetivo consiste en obtener un subconjunto, kernel o núcleo (N) de alternativas de tal forma que cualquier alternativa que no pertenezca a ese conjunto N es superada por al menos otra alternativa de N. Debe enfatizarse que no se trata de un conjunto de alternativas preferidas sino un conjunto en el que puede encontrarse la mejor solución de compromiso. Por tanto, el método ELECTRE I busca obtener una partición del conjunto de alternativas A, que es un conjunto finito y contiene todas las alternativas factibles consideradas, en dos subconjuntos N y A\N, tales que:

- Cada alternativa de A\N es superada por al menos una alternativa de N,
- Las alternativas de N son incomparables entre sí.
- $N \cap A\N$ es el conjunto vacío
- $N \cup A\N$ es el conjunto A

En la primera fase del ELECTRE I, que es la construcción de la relación de superación, a cada criterio se le asigna una ponderación o peso w_j , con $j = 1, 2, \dots, n$, siendo n el número de criterios, que refleja las preferencias del decisor. Estos pesos son crecientes en relación a la mayor importancia del criterio.

Se define el índice de concordancia para cada par ordenado de alternativas (a,b), $C(a,b)$ de la forma:

$$C(a,b) = \frac{1}{W} \sum_{j: g_j(a) \geq g_j(b)} w_j$$

Donde la suma de los pesos es $W = \sum_{j=1}^n w_j$, y siendo $g_j(a)$ la evaluación de la alternativa ***a*** bajo el criterio g_j

Así pues, el índice de concordancia toma valores comprendidos entre 0 y 1, y además mide la fuerza de la afirmación “la alternativa ***a*** supera a la alternativa ***b***”.

No obstante, cualquier superación de la alternativa b por la alternativa a puede ser debilitada o considerada dudosa por el índice de discordancia $D(a,b)$, que se define como

$$D(a,b) = 0 \quad \text{si} \quad g_j(a) \geq g_j(b) \quad , \text{ para todo } j = 0, 1, 2, \dots, n$$

$$D(a,b) = \frac{1}{d} \left\{ \max_{(a,b)/g_j(a) < g_j(b)} (g_j(b) - g_j(a)) \right\} \quad \text{si} \quad g_j(a) < g_j(b) \quad , \text{ para algún par } (a,b), \text{ siendo}$$

d la máxima diferencia para cualquier criterio y cualquier par de alternativas.

De esta forma, $D(a,b)$ es un índice cuyos valores están comprendidos entre 0 y 1, y se incrementa si la preferencia de la alternativa b sobre la alternativa a es importante para al menos un criterio. Este índice puede utilizarse, sólo si las evaluaciones de los diferentes criterios son comparables y no son de naturaleza cualitativa. Si el índice de discordancia alcanza un cierto valor umbral, la superación de la alternativa b por la alternativa a que podría indicar el índice de concordancia, es rechazada.

Así, la relación de superación del ELECTRE I se construye comparando los índices de concordancia y discordancia, previa especificación de sus respectivos límites o umbrales. Si se supone que c^* es el valor límite especificado para el índice de concordancia (umbral de concordancia como máximo igual a 1), y d^* es el valor límite especificado para el índice de discordancia (umbral de discordancia como mínimo igual a 0), entonces la relación de superación S , puede definirse tomar la forma:

$$a S b \Leftrightarrow C(a, b) \geq c^* \quad \text{y} \quad D(a, b) \leq d^*$$

Respecto a la segunda fase, que sería la explotación de la relación de superación, el método ELECTRE, mediante la utilización de los índices establecidos anteriormente, busca obtener una partición del conjunto discreto de alternativas A , que como ya se ha comentado, es un conjunto finito (recordemos que estamos en un método multicriterio discreto) y contiene todas las alternativas factibles consideradas, en dos subconjuntos N y $A \setminus N$, tales que:

- 1.- $\forall b \in A \setminus N$, existe $a \in N$, tal que $a S b$
- 2.- $\forall a, b \in N$, $a \text{ no } S b$ y $b \text{ no } S a$
- 3.- $N \cap A \setminus N$ es el conjunto vacío
- 4.- $N \cup A \setminus N = A$

Si se realiza la representación gráfica de la relación S , el conjunto N constituye el núcleo o kernel del grafo resultante. Si el grafo no posee circuitos, dicho núcleo existe y además contiene un único elemento. En cualquier caso, el número de alternativas del núcleo podría reducirse, relajando los valores de c^* (disminuyendo a partir de uno), y de d^* (incrementándose a partir de 0).

La búsqueda de la mejor solución de compromiso debería completarse con un análisis refinado de las alternativas que componen el núcleo. Dicho análisis deberá constar de un análisis de sensibilidad, introduciendo variaciones en los distintos parámetros utilizados, y en un estudio de la robustez de los resultados obtenidos, con respecto a las citadas variaciones. El análisis de sensibilidad es relativamente un estudio clásico en todos los ámbitos, las versiones de software que se realizan lo incluyen desde el principio. Sin embargo, el análisis de robustez en el sentido de la ayuda a la decisión multicriterio está aún en fase de discusión y estudio. No todos los autores están

habitados a este tipo de análisis, ni existe aún una misma metodología en este sentido. Es por este motivo que hay que resaltarlo y pormenorizarlo.

Es muy importante, para otorgar mayor fiabilidad al modelo que se considera, el efectuar el estudio de la robustez de los resultados obtenidos, sometiendo los valores de los pesos y de los umbrales definidos a posibles variaciones y observando los efectos que se producen en los resultados finales. Normalmente, se indica cuál es el rango de los valores de los parámetros dentro del cual el resultado permanece invariante y también se deben destacar las variables que son cruciales para modificar la alternativa elegida. Así pues, sobre la base de un estudio de robustez es posible superar algunas reservas o dudas manifestadas durante el proceso de decisión, tanto por parte del decisor, como por parte del analista, respecto de los valores originales de los parámetros. Si, al introducir variaciones en ambos extremos del intervalo establecido para sus valores iniciales, los resultados no sufren modificaciones significativas, entonces puede decirse que son robustos.

Generalmente, al estudiar la robustez de los resultados proporcionados por el ELECTRE I, se pueden someter a variaciones los valores siguientes:

- El rango de escalas de los valores utilizados en la valoración de los criterios
- Las ponderaciones de los criterios (w_j)
- El umbral de concordancia c^*
- El umbral de discordancia d^*

3.2.6. Aspectos clave de ELECTRE I

El método ELECTRE I involucra un proceso de relación que concluye con la elección de una única alternativa o un grupo de alternativas que constituyen el núcleo o kernel del conjunto de alternativas preferidas. Además, permite identificar aquellas alternativas que no pueden ser comparables con ninguna de las restantes. Es decir, que admite la relación binaria de Incomparabilidad.

Además, si una alternativa del núcleo es eliminada y no se vuelve a considerar, el proceso de selección completo deberá volverse a repetir, pues la exclusión puede alterar significativamente el núcleo. El proceso define con poca transparencia los límites entre una “buena” y “mala” alternativa.

El ELECTRE I es un proceso relativamente sencillo, pero parece no tener buena sensibilidad en la detección de pequeñas diferencias entre las alternativas, dados, por una parte por los umbrales de concordancia y discordancia únicos, y por otra parte, por su relación de superación binaria (superación o no superación).

La elección entre distintos tipos de estructuras de preferencia para los criterios es un punto importante que no puede descuidarse en el momento de elegir la versión más apropiada del modelo a utilizar, y que por supuesto debe de estar en consonancia con la naturaleza del problema en cuestión.

El modelo ELECTRE I garantiza que las opiniones del decisor son tenidas en cuenta durante todas las etapas del proceso de decisión. Esto se asegura tanto con su participación en la determinación de los valores de la matriz de decisión inicial, donde aparece la evaluación de cada alternativa bajo cada criterio, como en la asignación de los pesos o ponderaciones a los distintos criterios para reflejar su propia estructura de preferencia.

Aún cuando sea preferible evaluar los criterios de decisión de forma cuantitativa, una buena parte de ellos, requieren una evaluación cualitativa. Esto se subsana en el ELECTRE I con la determinación de alguna metodología apropiada y fácilmente comprensible para el decisor, que permita al analista efectuar la evaluación pertinente.

3.2.7. Método AHP

El Proceso Analítico Jerárquico más conocido por sus siglas en inglés AHP (*Analytic Hierarchy Process*) fue desarrollado por Thomas L. Saaty [65] [66]. Se clasifica dentro de los métodos multicriterio discretos. También podemos encontrar información en los trabajos de Korhonen [64].

Su ideología se basa en que cuando un problema es demasiado complejo hay que descomponerlo, tomar decisiones sobre problemas más pequeños y finalizar agregando las soluciones de esos problemas. Parte del axioma de que el ser humano es capaz de tomar decisiones razonables sobre problemas pequeños.

Incluye un método propio para la asignación de pesos relativos entre todos los criterios que intervienen en el problema de decisión. Para ello el método propone empezar por una comparación, por parejas, de los criterios. Esta comparación la debe establecer el decisor, basándose en su experiencia, y en principio es algo sencillo de realizar. Lo que en definitiva se persigue es disminuir la complejidad del problema, abordándolo por partes, para que el decisor pueda aplicar su conocimiento a esas partes por separado.

Por cada pareja de criterios, se establece el número de veces que un criterio es más importante que otro, obteniendo de esta manera una matriz con los valores decididos. Esos valores responden a la escala de Saaty, que va del 1 al 9 (el valor 1 indica que dos criterios son igual de importantes, y el valor 9 indica que un criterio es extremadamente más importante que el otro).

El problema se modela como una jerarquía en cuya cúspide se sitúa el objetivo, de él cuelgan los criterios, y por debajo se encuentran las alternativas de solución.

Figura 29: Representación del método AHP

Una vez que se han calculado los pesos relativos de los criterios, se toma criterio a criterio, y por cada uno se hace una evaluación de las magnitudes relativas de todas las alternativas. El resultado es una matriz de pesos de alternativas x criterios, que permite de una forma sencilla calcular el valor de la magnitud definitiva de cada alternativa, para así encontrar la solución.

3.2.8. Método PROMETHEE

Como en otros métodos multicriterio vistos hasta ahora, en el método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations) [62][63], también se parte de establecer la importancia relativa de cada uno de los criterios, para luego definir una estructura de preferencias entre las alternativas.

En este método, cuando se comparan dos alternativas basándose en un cierto criterio, se manejan los conceptos de preferencia estricta y de indiferencia. Una vez identificados los criterios, se requiere que a cada criterio se le asocie una función mediante la cual se va a valorar la preferencia de una alternativa con respecto a otra. Es decir es una función que indica cómo se comparan las magnitudes de un cierto criterio, para cada alternativa. El método define seis tipos de funciones: Usual (Normal), Linear (Lineal), Level (Escalonado), U-Shape (en forma de U), V-Shape (en forma de V) y Gaussian (Gaussiana). Estas funciones dependen de dos parámetros ajustables:

- q, umbral que sirve para definir el área de indiferencia;
- p, umbral que sirve para definir el área de preferencia estricta;

Para ajustar los valores de estos parámetros se pueden considerar medidas estadísticas (medias y desviaciones estándar) de los datos recogidos, y sobre todo aplicación del sentido común y la experiencia de las personas que conocen el problema.

La forma de las funciones es la siguiente (donde “d” es la variable independiente que representa la diferencia del valor, de la magnitud del criterio, en cada una de las alternativas comparadas):

- Usual (Normal), equivale simplemente a decir que si el valor para una alternativa es mayor que para la otra, hay preferencia estricta de la primera alternativa:

$$P(d) = \begin{cases} 0 & \text{si } d \leq 0 \quad (\text{Indiferencia}) \\ 1 & \text{si } d > 0 \quad (\text{Preferencia estricta}) \end{cases}$$

- U-Shape (en forma de U):

$$P(d) = \begin{cases} 0 & \text{si } d \leq q & (\text{Indiferencia}) \\ 1 & \text{si } d > q & (\text{Preferencia estricta}) \end{cases}$$

- V-Shape (en forma de V):

$$P(d) = \begin{cases} 0 & \text{si } d \leq 0 & (\text{Indiferencia}) \\ \frac{d}{p} & \text{si } 0 < d \leq p \\ 1 & \text{si } d > p & (\text{Preferencia estricta}) \end{cases}$$

- Level (Escalonado):

$$P(d) = \begin{cases} 0 & \text{si } d \leq q & (\text{Indiferencia}) \\ \frac{1}{2} & \text{si } q < d \leq p \\ 1 & \text{si } d > p & (\text{Preferencia estricta}) \end{cases}$$

- Linear (Lineal):

$$P(d) = \begin{cases} 0 & \text{si } d \leq q & (\text{Indiferencia}) \\ \frac{d-q}{p-q} & \text{si } q < d \leq p \\ 1 & \text{si } d > p & (\text{Preferencia estricta}) \end{cases}$$

- Gaussian (Gaussiana):

Existe igualmente un proceso de asignación de la importancia o peso (w_j) entre criterios que también depende del conocimiento que se tenga del problema.

A partir de las funciones P , para cada par de alternativas " a_{xi} ", y teniendo en cuenta los pesos de los criterios " w_j ", el algoritmo de PROMETHEE se inicia calculando el valor de preferencia agregada:

$$\pi(a_{x1}, a_{x2}) = \sum_{j=1}^k w_j P_j(a_{x1}, a_{x2})$$

donde $P_j(a_{x1}, a_{x2})$ es el grado de preferencia de la alternativa a_{x1} sobre la a_{x2} , debido al criterio " j ".

Después se calcula el flujo positivo o de salida de preferencias para cada alternativa:

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x)$$

donde A es el conjunto de alternativas.

A continuación el algoritmo calcula el flujo negativo o de entrada de preferencias:

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a)$$

El conjunto de los flujos positivos y negativos constituyen el resultado del método PROMETHEE I, que proporciona un orden parcial entre las alternativas.

Si se quiere obtener un completo orden total hay que fijarse en el valor del flujo neto de cada alternativa " a ", que se calcula así:

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$$

De esta manera las alternativas quedarán ordenadas, de mayor a menor, por su valor de flujo neto. Esto se conoce como método PROMETHEE II.

Existen otras extensiones del método, como PROMETHEE V, que está indicado para problemas en los que se necesita escoger un conjunto de alternativas como las mejores (no sólo una), usando una serie de restricciones.

3.3. Redes Neuronales Artificiales

Si pretendemos resolver un problema, compilando un programa para ser ejecutado en un ordenador, de forma convencional, el objetivo del programador será modelar matemáticamente (con un cierto grado de formalismo) el problema en cuestión, y posteriormente implementar una solución (programa) usando un algoritmo codificado que tenga una serie de propiedades que permitan resolver dicho problema. Por contra, la aproximación basada en las Redes Neuronales Artificiales (*Artificial Neural Network*) parte de un conjunto de datos de entrada y salida suficientemente significativo y el objetivo es conseguir que la red aprenda automáticamente las propiedades deseadas. Una idea general puede encontrarse en [71] [73] [74] o [75]. En este sentido, el diseño interno de la red tiene menos que ver con cuestiones como los flujos de datos y la detección de condiciones, y más que ver con cuestiones tales como la selección del modelo de red, la de las variables a incorporar y el preprocesamiento de la información que formará el conjunto de entrenamiento. Precisamente por esto, el proceso por el que los parámetros de la red se adecuan a la resolución de cada problema no se denomina programación sino que se suele denominar entrenamiento neuronal.

Las redes neuronales no son más que una manera de emular ciertas características propias de los humanos, como la capacidad de memorizar y de asociar hechos. Entran dentro del conjunto de técnicas denominadas como Inteligencia Artificial, que lo que estudian son aspectos de la inteligencia humana que pueden ser simulados mediante máquinas. Si se examinan con atención aquellos problemas que no pueden expresarse a través de un algoritmo, se observará que todos ellos tienen una característica en común: la experiencia. El hombre es capaz de resolver estas situaciones acudiendo a la experiencia acumulada. Así, parece claro que una forma de aproximarse al problema consista en la construcción de sistemas que sean capaces de reproducir esta característica humana.

En definitiva, las redes neuronales constituyen un modelo artificial y simplificado del cerebro humano, que es el ejemplo más perfecto del que disponemos para un sistema que es capaz de adquirir conocimiento a través de la experiencia. Y la unidad básica de procesamiento de la red está inspirada en la célula fundamental del sistema nervioso humano: la neurona.

Todos los procesos del cuerpo humano se relacionan en alguna u otra forma con la actividad o inactividad de estas neuronas. Las mismas son un componente relativamente simple del ser humano, pero cuando millares de ellas se conectan en forma conjunta se hacen muy poderosas. También, es bien conocido que los humanos son capaces de aprender. Aprendizaje significa que aquellos

problemas que inicialmente no pueden resolverse, pueden ser resueltos después de obtener más información acerca del problema.

Por lo tanto, las Redes Neuronales:

- Consisten de unidades de procesamiento que intercambian datos o información.
- Tienen capacidad de aprender y mejorar su funcionamiento

Ejemplos de aplicación de redes neuronales a problemas reales pueden encontrarse en [68], [69] y [72], trabajos todos en los que ha participado el autor de esta tesis. También ocurre lo mismo con los trabajos [67] y [70] relativos a algoritmos de aprendizaje.

3.3.1. Composición de una red neuronal

Las redes neuronales son modelos que intentan reproducir el comportamiento del cerebro y es por ello que constan de dispositivos elementales de proceso: las neuronas. A partir de ellas, se pueden generar representaciones específicas, de tal forma que un estado conjunto de ellas puede significar una letra, un número u otro objeto. Generalmente se pueden encontrar tres tipos de neuronas: las de entrada, las intermedias y las de salida.

Las de entrada son las que reciben estímulos externos relacionados con el aparato sensorial, es decir, las que tomarán la información de entrada.

Dicha información se transmite a ciertos elementos internos que se ocupan de su procesamiento. Es en las sinapsis y neuronas correspondientes a este segundo nivel donde se genera cualquier tipo de representación interna de información. Como no tienen relación directa con la información de entrada ni con la salida, estos elementos se denominan unidades ocultas.

Una vez finalizado el período de procesado, la información llega a las unidades de salida, cuya misión es dar la respuesta al sistema.

A continuación se puede ver en la siguiente figura, un esquema de una red neuronal:

Figura 30: Esquema de una Red Neuronal

Se conoce como nivel o capa a un conjunto de neuronas cuyas entradas provienen de la misma fuente, y cuyas salidas se dirigen a un mismo destino. Los datos ingresan por medio de la "capa de entrada", pasan a través de la "capa oculta" y salen por la "capa de salida". Cabe mencionar que la capa oculta puede estar constituida por varias capas.

La unidad componente de la red, y unidad de proceso, es la neurona artificial que pretende mimetizar las características más importantes de las neuronas biológicas. Cada neurona i -ésima está caracterizada, en cualquier instante, por un valor numérico denominado valor o estado de activación; asociado a cada unidad, existe una función de salida, que transforma el estado actual de activación en una señal de salida. Dicha señal es enviada a través de los canales de comunicación unidireccionales a otras unidades de la red; estos canales la señal se modifica de acuerdo con la sinapsis (el peso) asociada a cada uno de ellos según determinada regla.

Figura 31: Representación del funcionamiento de una neurona

Existen cuatro funciones de transferencia típicas que determinan distintos tipos de neuronas:

- Función escalón
- Función lineal y mixta
- Sigmoidal
- Función gaussiana

La función escalón únicamente se utiliza cuando las salidas de la red son binarias. La salida de una neurona se activa sólo cuando el estado de activación es mayor o igual a cierto valor umbral. La función lineal o identidad equivale a no aplicar función de salida. Las funciones mixta y sigmoidal son las más apropiadas cuando queremos como salida información analógica.

La dinámica que rige la actualización de los estados de las unidades puede ser de dos tipos: asíncrono y modo síncrono. En el primer caso, las neuronas evalúan su estado continuamente según les va llegando información, y lo hacen de forma independiente. En el segundo la información llega de forma continua, pero los cambios se realizan simultáneamente, bajo la sincronización de un reloj.

Según la estructura interna de interconexión de las neuronas componentes podemos tener diferentes tipos de redes neuronales multicapa:

- Con conexiones hacia adelante (*feedforward*). Aquí las señales de salida de las neuronas siempre se propagan desde la entrada hacia la salida, a través de las capas de la red. No existen conexiones hacia atrás, y normalmente tampoco laterales. Las redes *feedforward* más conocidas son: PERCEPTRON, ADALINE, MADALINE, LINEAR ADAPTATIVE MEMORY, DRIVE-REINFORCEMENT, BACKPROPAGATION. Todas ellas son útiles en aplicaciones de reconocimiento o clasificación de patrones.

- Con conexiones hacia adelante y hacia atrás (*feedforward/feedback*). En éste tipo de redes circula información tanto hacia delante como hacia atrás durante el funcionamiento. En general, suelen ser bicapas, existiendo por lo tanto dos conjuntos de pesos: los correspondientes a las conexiones de la capa de entrada hacia la capa de salida, y los de las conexiones *feedback* de la segunda a la primera. Algunas redes tienen un funcionamiento basado en lo que se denomina resonancia, de tal forma que las informaciones en la primera y segundas capas interactúen entre sí hasta que alcanzan un estado estable. Los dos modelos de red de dos capas más conocidos son la red ART (*Adaptive Resonant Theory*) y la red BAM (*Bidirectional Associative Memory*). En este grupo de redes también puede existir conexiones laterales entre neuronas de la misma capa.

3.3.2. Entrenamiento de una red neuronal

La capacidad de aprendizaje adaptativo es una de las características más atractivas de redes neuronales. Esto es, aprenden a llevar a cabo ciertas tareas mediante un entrenamiento con ejemplos. Las redes neuronales son sistemas dinámicos autoadaptativos. Son adaptables debido a la capacidad de autoajuste de los elementos de procesamiento (neuronas) que componen el sistema. Son dinámicos, pues son capaces de estar constantemente cambiando para adaptarse a las nuevas condiciones.

En el proceso de aprendizaje, los enlaces ponderados de las neuronas se ajustan de manera que se obtengan ciertas salidas esperadas ante la excitación con entradas conocidas. Una red neuronal no necesita un algoritmo para resolver un problema, ya que ella puede generar su propia distribución de pesos en los enlaces entre neuronas, mediante el aprendizaje. También existen redes que continúan aprendiendo a lo largo de su vida, después de completado su período de entrenamiento.

La función del diseñador es únicamente la definición de la arquitectura apropiada. No es problema del diseñador el cómo la red aprenderá a discriminar. Sin embargo, sí es necesario que desarrolle un

buen algoritmo de aprendizaje que le proporcione a la red la capacidad de discriminar, mediante un entrenamiento con patrones.

Los cambios que se producen durante el proceso de aprendizaje se reducen a destrucción, modificación y creación de conexiones entre las neuronas. La creación de una nueva conexión implica que el peso de la misma pasa a tener un valor distinto de cero, e igualmente, una conexión se destruye cuando su peso pasa a ser cero. El proceso de aprendizaje ha terminado (la red ha aprendido) cuando los valores de los pesos permanecen estables según un cierto umbral de medición.

Una de las clasificaciones de redes neuronales obedece al tipo de aprendizaje utilizado. Así se pueden distinguir:

- Neuronas con aprendizaje supervisado
- Neuronas con aprendizaje no supervisado

La diferencia fundamental entre ambos tipos es que en las primeras el proceso de aprendizaje se realiza mediante un entrenamiento controlado por un agente externo (supervisor o maestro) que determina la respuesta que debería generar la red a partir de una entrada determinada. El supervisor comprueba la salida de la red y en caso de que ésta no coincida con la deseada, se procederá a modificar los pesos de las conexiones, con el fin de que la salida obtenida se aproxime a la deseada. Se suelen considerar tres formas de llevar a cabo el aprendizaje:

- Aprendizaje por corrección de error
- Aprendizaje por refuerzo
- Aprendizaje estocástico.

El aprendizaje por corrección de error consiste en ajustar los pesos de las conexiones de la red en función de la diferencia entre los valores deseado y los obtenidos en la salida de la red; es decir, en función del error cometido en la salida. Dentro de este grupo de técnicas de aprendizaje se enmarca el conocido algoritmo de retropropagación del error (*error backpropagation*). En este algoritmo las salidas de error se propagan hacia atrás, partiendo de la capa de salida, hacia todas las neuronas de la capa oculta que contribuyen directamente a la salida. Sin embargo las neuronas de la capa oculta solo reciben una fracción de la señal total del error, basándose aproximadamente en la contribución relativa que haya aportado cada neurona a la salida original. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido una señal de error que describa su contribución relativa al error total.

La importancia de este proceso consiste en que, a medida que se entrena la red, las neuronas de las capas intermedias se organizan a sí mismas de tal modo que las distintas neuronas aprenden a reconocer distintas características del espacio total de entrada.

3.4. Métodos SWARM

Los métodos basados en inteligencia de enjambre (métodos SWARM) pertenecen a una rama de la Inteligencia artificial que estudia el comportamiento colectivo de sistemas que no tienen un ente director. Es decir son sistemas que se auto-organizan de forma descentralizada. La expresión fue introducida por Gerardo Beni y Wang Jing en 1989, en el contexto de los sistemas robóticos móviles [76].

Estos métodos están inspirados en la naturaleza, especialmente por ciertos sistemas biológicos. Los sistemas de inteligencia de enjambre están típicamente formados por una población de partículas o individuos simples que interactúan localmente entre ellos y con su medio ambiente. Los individuos siguen reglas simples y, aunque no existe una estructura de control centralizado que gobierne el comportamiento de cada uno de ellos, las interacciones locales entre ellos tienen como consecuencia un comportamiento global complejo. Como ejemplos naturales tenemos las colonias de hormigas, colmenas de abejas, el alineamiento de las aves en vuelo, agrupamiento de bancos de peces en el mar, el comportamiento de rebaños durante el pastoreo o el crecimiento bacteriano.

Existen muchos algoritmos que se enmarcan dentro de los métodos SWARM. Entre ellos tenemos:

- Optimización por enjambre de partículas, PSO (*Particle Swarm Optimization*)
- Optimización de colonia de hormigas, ACO (*Ant Colony Optimization*)
- Optimización de múltiples enjambres
- Algoritmo de colonia de abejas
- Algoritmo de altruismo
- Sistemas inmunológicos artificiales
- Algoritmo murciélago
- Búsqueda de sistema cargado
- Búsqueda Cuckoo
- Algoritmo de búsqueda diferencial
- Algoritmo Firefly
- Optimización Enjambre de Luciérnagas

Entre todos ellos he elegido profundizar en el primero por tener unas características más adecuadas al problema tratado en el presente trabajo.

3.4.1. Optimización por Enjambre de Partículas

La Optimización por enjambre, cúmulo o nube de partículas, conocida en inglés como PSO (*Particle Swarm Optimization*) fue inicialmente propuesta por Kennedy y Eberhart en 1995 [85]. Otros investigadores destacables son: Angeline, Peter J. [92]; Carlisle, Anthony J.; Engelbrecht [93], Andries P.[93]; Fukuyama, Yoshikazu; Hu, Xiaohui; Mohan, Chilukuri [82]; Parsopoulos, Konstantinos; Shi, Yuhui [94][98]; Sinclair, Mark C.; van den Bergh [93], Frans y Xie [95], Xiaofeng.

En un problema de PSO se define la existencia de un número de partículas localizadas en el espacio de búsqueda de alguna función objetivo, que se pretende optimizar.

Cada partícula realiza un seguimiento de sus coordenadas en el hiperespacio, las cuales se asocian con la mejor solución que ha logrado la propia partícula hasta el momento (entiéndase “mejor” con respecto a la función objetivo), y con la mejor solución que ha logrado el conjunto del enjambre.

El fundamento del algoritmo consiste ir cambiando, a cada paso del tiempo, la posición de cada partícula según una velocidad de la misma. La velocidad se ve afectada por la posición actual, su posición individual y por la posición global de todas las partículas. En la programación el algoritmo se debe fijar la velocidad máxima a la que se pueden mover las partículas para evitar que sea tan alta como para hacer que las partículas vuelen fuera del espacio útil y se produzcan desbordamientos.

En el contexto de PSO hay que entender el término “velocidad” como una traducción del inglés “*velocity*”. Es decir, no es simplemente una distancia dividida por unidad de tiempo, sino que cuenta con un carácter de dirección en el espacio de nuestro problema, o sea, tiene características por tanto de vector. Dicho vector aplicado a la posición de una partícula en el espacio nos proporcionará la posición de la partícula en la siguiente iteración del algoritmo.

Figura 32: Visión espacial de algoritmo PSO

La inicialización del PSO es, al igual que para los algoritmos genéticos, un conjunto de soluciones aleatorias (posiciones), pero el PSO añade además, que a esas soluciones potenciales se les asigna una velocidad inicializada también se forma estocástica, de modo que después las soluciones potenciales (llamadas partículas) “vuelan” por el espacio.

Cada una de las partículas evalúa el objetivo de la función en su posición actual y posteriormente determinan su movimiento en el espacio de búsqueda combinando la información de su posición actual, su mejor posición encontrada y la mejor posición del conjunto de partículas del enjambre; todo ello afectado por algunas perturbaciones aleatorias.

La siguiente iteración se lleva a cabo cuando todas las partículas que forman el enjambre se hayan movido.

Finalmente el enjambre, como un todo, probablemente se sitúe muy próximo a un óptimo de la función objetivo.

Mientras el sistema realiza iteraciones, las partículas individuales son conducidas hacia un óptimo global basado en la interacción de sus búsquedas particulares y las búsquedas globales del conjunto. El criterio de parada dependerá del tipo de problema que estemos acometiendo:

- Puede ser en forma de umbral de error, cuando tenemos la restricción de cumplir con un cierto margen de error.
- O de iteraciones máximas, si queremos limitar el número de pasos del algoritmo.
- O de tiempo máximo de computación, si el entorno de problema es un sistema que deba responder en tiempo real o en un tiempo rápido.

Cuando se cumple con el criterio de parada, las iteraciones deben cesar y el mejor de los vectores encontrados será la solución al problema.

Parece evidente que cuantas más iteraciones se realicen (lo cual implica más posiciones analizadas), mejor será la solución, pero hay que tener en cuenta que los recursos necesarios para cada iteración tienen un precio y hay que evaluar si merece la pena la mejora que puedas hallar en relación al coste que supone. Por ello se marca un criterio de parada.

Descripción de los pasos del algoritmo

En primer lugar introducimos la nomenclatura que vamos a utilizar posteriormente para describir el algoritmo paso a paso. Cada individuo (partícula) del PSO se compone de tres vectores dimensionales:

- X_i que es la posición actual de la partícula i . Una posición es un conjunto de coordenadas (tantas coordenadas como dimensiones tiene el espacio) que describe la situación actual en espacio de búsqueda.
- P_i que es la mejor posición encontrada hasta el momento por la partícula i . También será un conjunto de coordenadas.
- $PBest-i$ ("previous best") que almacena la aptitud (*fitness*) de la posición p_i , con el objetivo de hacer comparaciones de manera más sencilla.
- V_i es la velocidad de la partícula i .

Puesto que el PSO no se trata de una colección de partículas individuales, sino que interactúan entre ellas para poder así progresar y lograr una buena solución al problema, también se tiene en cuenta el siguiente vector común para todo el enjambre:

- G que es el conjunto de coordenadas de la mejor posición encontrada hasta el momento por cualquier partícula del vecindario de la partícula. Aquí cuando se habla de vecindario existe la opción de considerar un vecindario local, en el que sólo con vecinas las partículas

inmediatamente cercanas (tendríamos entonces varias Gs en todo el enjambre, una por “barrio”), o un vecindario global, que realmente se refiere a todo el enjambre.

- GBest, es análogo a Pbest-i, pero almacena el valor de G.

Figura 33: Influencias en el movimiento de una partícula en PSO

En resumen, podemos describir el algoritmo PSO como una técnica de optimización para usar en un espacio de números reales, cuyas soluciones potenciales del problema son representadas como partículas que poseen coordenadas X_i y velocidades de cambio V_i en un espacio N-dimensional. Cada partícula i tiene el registro de su mejor rendimiento previo en el vector P_i y a la variable G representa la posición del mejor rendimiento encontrado por todo el conjunto hasta el momento. En cada iteración del algoritmo se realiza: el ajuste de V_i hacia la dirección de P_i y de G , y la actualización y evaluación de cada partícula y ajuste de los parámetros P_i y de G .

En primer lugar hay que inicializar la población por lo que para cada partícula i se hace lo siguiente:

- Se inicializa aleatoriamente X_i con la condición de que se encuentre dentro del límite inferior y superior del espacio de búsqueda.
- Se asigna a P_i la misma posición que se acaba de hallar aleatoriamente para x_i , puesto que al ser la iteración inicial, el mejor valor encontrado por la partícula corresponde con la única posición que ha explorado, la actual.
- Se calcula la aptitud (*fitness*) de X_i para la partícula y se otorga el valor calculado a su correspondiente PBi .
- Se inicializa G con la posición X_1 de la primera partícula analizada y el *fitness* de X_1 se otorga a $GBest$. Durante el proceso de inicialización, para el resto de las partículas lo que se hace es mirar si su PBi es mejor que el $GBest$, en cuyo caso se reemplaza G por la posición X_i y el valor de X_i se le da a la variable $GBest$.
- Se inicializa de manera aleatoria la velocidad V_i .

Comienzan las iteraciones del algoritmo en las que se llevan a cabo los siguientes pasos para cada partícula i (mientras no se cumpla el criterio de parada):

- Se actualiza la velocidad de la partícula según la siguiente fórmula:

$$V_i = \alpha * V_i + \beta * \text{rand}() * (P_i - X_i) + \gamma * \text{rand}() * (G - X_i)$$

Donde $\text{rand}()$ son números aleatorios, y α , β y γ son parámetros muy importantes que se deben definir bien ya que regulan el comportamiento y la eficacia del modelo. Son los responsables de que haya un equilibrio entre la exploración y explotación del algoritmo:

- La variable α representa al factor de inercia de la partícula.
 - La variable β representa la influencia de la memoria de la partícula, que hace que la partícula tienda hacia su mejor posición en el pasado.
 - La variable γ representa a la influencia del enjambre, la cual hace que la partícula tienda hacia la mejor posición que existe dentro del enjambre.
 - El factor $\text{rand}()$ es un número aleatorio entre 0 y 1, que añade una componente de incertidumbre a la influencia de la memoria y la del enjambre. De esta manera el algoritmo no es tan rígido, y puede encontrar soluciones que de otra manera no encontraría.
 - El resto de variables son X_i que es la posición actual de la partícula, P_i que es la mejor posición de la partícula hasta el momento, y G que es la mejor posición desde el punto de vista global, de todo el enjambre. Recordemos que si usáramos una relación de vecindario local, tendríamos varias G s.
- Se actualiza la posición actual de la partícula, añadiendo a X_i las coordenadas de V_i y obteniendo así la nueva X_i que utilizaremos para esta iteración. La fórmula es la siguiente:

$$X_i = X_i + V_i.$$

- La posición actual X_i se evalúa mediante la función objetivo como posible solución al problema.
- Si la evaluación de la posición es mejor que ninguna de las que han sido encontradas hasta el momento por la partícula (*Fitness* de X_i mejor que PBi):
 - Se actualiza P_i , sustituyendo sus coordenadas por las de X_i .
 - Se actualiza el valor de $PBest-i$ otorgándole el valor del *fitness* de X_i .
- En caso contrario el P_i y $PBest-i$ de la partícula no se modifican.
- Sólo en caso de que la partícula haya mejorado su P_i , se examina si el $PBest-i$ de esa partícula es mejor que $GBest$, y en caso de ser cierto:
 - Se actualiza G , sustituyendo sus coordenadas por las de P_i .
 - Se actualiza el valor de $GBest$ otorgándole el valor de $PBest-i$.
- En caso contrario G y $GBest$ conservan sus valores.
- Se evalúa la condición de parada (establecida por el usuario) y:

- Si no se ha alcanzado la condición de parada, se vuelve al primer paso del proceso de las iteraciones.
- Si la condición de parada se cumple, se devuelve G como la mejor posición encontrada y G_{Best} como el mejor valor hallado. Y se finaliza el algoritmo.

Por último, conviene tener cuidado con los óptimos locales. Si no se utilizan unos valores de los parámetros α , β y γ que permitan un amplio rango de exploración dentro del espacio de búsqueda, es muy frecuente que el algoritmo PSO encuentre un óptimo local. Esto es, el algoritmo puede encontrar una mejor posición global de todas la partículas, que no varía con las sucesivas iteraciones, pero que no es una solución óptima global. Conviene detectar estas situaciones, sobre todo si se producen en las etapas tempranas de iteraciones, y modificar el movimiento de las partículas para sacar al enjambre del óptimo local (para que las partículas sigan explorando nuevas posiciones).

4. ESTADO DEL ARTE EN LOS PROCESOS DE MANTENIMIENTO

Hoy en día vivimos inmersos en el mundo de *internet*, toda la información está al alcance de casi todo el mundo en un instante de tiempo. De hecho hay tanta información que por exceso, a veces, se hace inabarcable e inmanejable. Podemos encontrar múltiples compañías que se dedican a múltiples negocios, entre ellos al negocio de la gestión de redes de telecomunicación.

Podríamos estudiar el estado del arte de los procesos de mantenimiento desde varias perspectivas:

- Por un lado analizando a las propias compañías operadoras, sabiendo cómo afrontan la problemática en sus departamentos de mantenimiento.
- Por otro tendríamos las compañías de *software* que ofrecen soluciones para la gestión de redes y algunas, en concreto para el área funcional del mantenimiento de red.
- Por último las que podríamos llamar compañías que ofrecen servicios de integración. Es decir no ofrecen un producto concreto sino que ofrecen sus servicios para integrar y adaptar un producto software de otro suministrador.

Figura 34: Aspectos relativos a los procesos de mantenimiento

4.1. Soluciones adoptadas en las Operadoras

Este es quizá el enfoque más difícil de analizar. Las compañías guardan secreto sobre sus procesos internos ya que forman parte de la información estratégica de la misma.

Por ello no es fácil encontrar información sobre el funcionamiento interno de una Operadora, sobre los departamentos que tiene y la dimensión de los mismos, ni sobre los sistemas *software* que utilizan.

Una de las pocas maneras de conseguir esta información es desde dentro. Por mi experiencia de haber trabajado más de veinte años para varias grandes compañías de telecomunicación, poseo esa información. No es mi intención desvelar aquí datos sensibles de dichas compañías, ni violar ninguna regla de confidencialidad de la información. Únicamente comentaré varias generalidades que en principio son aplicables a cualquier operadora grande, que maneje servicios para millones de clientes.

La propia dimensión de una gran empresa hace que sea difícil de manejar. Aunque existan departamentos estratégicos que establezcan directivas generales de actuación no es fácil que esas directivas lleguen a aplicarse correctamente en todas las áreas de la empresa.

Los departamentos de mantenimiento de la red tienen que afrontar los problemas reales que se encuentran día a día, y si no se les provee de una solución que resuelva su problemática intentarán resolverlo por su cuenta.

La realidad que encontramos suele ser que las diferentes secciones o grupos de trabajo dentro del departamento de mantenimiento tienen cada una sus herramientas y procesos de operación propios para resolver su trabajo. Muchas veces se trata de sistemas *software* hechos a medida por algún empleado aventajado del departamento, que se adaptan muy bien a la problemática que existe en un momento dado, pero que luego es casi imposible de evolucionar (bien porque se usaron lenguajes o entornos de desarrollo que han quedado obsoletos, o bien porque la persona que lo implementó se ha ido a otro departamento o empresa y nadie más sabe cómo modificar el desarrollo). Otras veces habrán sido desarrollos encargados a algún proveedor informático externo, pero igualmente suele aparecer el problema de la obsolescencia, y del coste de la evolución del desarrollo. También hay que contar con las restricciones presupuestarias que tiene cada departamento cosa que influye en la calidad de los desarrollos que pueden contratar.

Estas soluciones particulares que tiene cada sección difícilmente tienen integraciones entre ellas, o las integraciones son débiles y mediante procesos con bastantes interacciones manuales. Al no haber existido una coordinación global que buscara esa integración, eso es lo que nos encontramos.

Suele ocurrir que cada cierto tiempo, desde la Dirección de la compañía, se impone el uso de un nuevo sistema de gestión (a veces, por alguna decisión política de dudosa justificación técnica, sin ni siquiera haber utilizado ninguna de las herramientas que nos proporciona la “teoría de la decisión”). Las secciones implicadas evidentemente se suelen oponer a la implantación de ese nuevo sistema, sobre todo si les va a suponer un trabajo extra por su parte para ayudar a la puesta en producción. Estas transiciones suelen costar mucho tiempo y esfuerzo, tanto por parte de los que serán usuarios del nuevo sistema como por parte de los implantadores, integradores o desarrolladores de la misma.

Al final, algunas de esas iniciativas llegan a buen puerto y el nuevo sistema acaba implantándose con éxito. Es probable que aún así no satisfaga el cien por cien de las necesidades de todas las secciones y grupos que lo utilizarán y que por tanto aún persistan alguno de los sistemas previos, o partes de los mismos, conviviendo con el nuevo.

Con el transcurrir del tiempo irán apareciendo nuevas necesidades funcionales. El nuevo sistema sufrirá adaptaciones y mejoras en la medida que su escalabilidad y la disponibilidad de un equipo de desarrollo para realizarlas, lo permita.

Al final, por obsoleto, o por otra decisión de la alta dirección, llegará otro nuevo sistema que lo pretenderá sustituir, y el ciclo descrito aquí se volverá a repetir.

Otro factor a tener en cuenta, cuando estamos hablando de una gran compañía, es que los nuevos sistemas normalmente son desarrollos a medida. Es complejo implantar un producto comercial, de los existentes en el mercado, porque es difícil que cumpla con todos los requisitos de todas las áreas usuarias. Y aunque se implante un producto de ese tipo normalmente requiere de un trabajo grande de configuración y adaptación. Trabajo que a veces es comparable con haber realizado un desarrollo a medida partiendo desde cero.

En compañías operadoras más pequeñas, que gestionen sólo miles o cientos de miles de clientes, o compañías de reciente creación, que no tengan sistemas previos implantados, es más fácil que tenga éxito la implantación de algún *software* comercial. Requerirá de pocas adaptaciones y será más fácil que cubra todos los requisitos de los usuarios.

En el siguiente apartado se hace un breve recorrido por soluciones comerciales existentes.

4.2. Software de Gestión de Red

Englobaremos en este apartado productos o paquetes comerciales que tienen como objetivo servir de soporte los procesos de mantenimiento de una Operadora de telecomunicación, es decir constituir un OSS con el fin de conservar en buen estado la planta y los servicios que se prestan a los clientes.

4.2.1. Productos

Desde siempre, los productos estrella que se han utilizado en los departamentos de O+M han sido los sistemas de gestión de alarmas.

Ya hemos explicado que en la red se producen problemas o fallos (tanto *hardware* como *software*). La manifestación observable de estos fallos comúnmente se denominan alarmas. Las alarmas son eventos definidos por los fabricantes de los equipos de red y observables por los operadores que trabajan en los departamentos de mantenimiento de las operadoras. Lo habitual es que cada fabricante que vende un determinado equipamiento de red, ofrezca a su vez su propio sistema de gestión de dicho equipamiento. Existen normas estándar en la catalogación de alarmas, normas que suelen seguir la mayoría de los suministradores de equipos. Los sistemas de gestión pueden ir desde unos simples gestores de equipos aislados (gestores de elementos de red) hasta sistemas más complejos que integren la gestión de múltiples equipos.

Las modernas redes de telecomunicaciones pueden producir miles de alarmas por día, dificultando por ello la tarea de monitorización de red y gestión de fallos, en tiempo real. Entre tal volumen de información, algunas alarmas pueden pasar desapercibidas o ser malinterpretadas. Es necesario aplicar el concepto de correlación de alarmas [121] mediante el cual se determina cual es la alarma o causa raíz de un conjunto de alarmas que presentan una cierta relación, de esta manera se reduce

el volumen de eventos que un operador se ve obligado a tratar. El proceso de correlación de alarmas está compuesto de varias tareas:

- Compresión: la reducción de las múltiples ocurrencias de una alarma a una sola.
- Contabilidad: sustitución de un determinado número de ocurrencias de una alarma por una nueva alarma.
- Supresión: inhibición de una alarma de menor criticidad en presencia de otra más crítica.
- Generalización: referencia a una alarma por su superclase.

La correlación de alarmas puede ser usada para aislar fallos de la red, diagnosticar la causa raíz, elegir acciones correctivas, mantenimiento proactivo y análisis de tendencias.

Por ejemplo, IBM - Netcool Network Management [105] es una solución especializada en descubrir, visualizar, detectar, configurar, activar, integrar y reparar una red. Esta solución combina IBM Tivoli Netcool/OMNIbus, IBM Tivoli Network Manager e IBM Tivoli Netcool Configuration Manager. Consta de:

- Un conjunto integrado de herramientas de gestión de red, que proporcionan descubrimiento de red, supervisión, gestión de sucesos y configuración.
- Creación de informes y visibilidad centralizada, que incluye entornos de red dispersos y complejos.
- Supervisión y descubrimiento de red.
- Gestión de errores y sucesos, que ayuda a resolver problemas de red de forma más rápida.
- Funcionalidades de configuración de red, que dan soporte a la gestión eficiente de despliegue y cambios.

La empresa Infovista [106] proporciona su producto Vista360 que es una herramienta visual que proporciona información de medidas de rendimiento de una red en casi tiempo real.

COMARCH por su parte [102], además de ser una empresa de integradores, posee un amplio abanico de soluciones relacionadas con las telecomunicaciones, que abarcan:

- Inventario de red y servicios.
- Planificación de red.
- Gestión de errores y aseguramiento de la calidad.
- Gestión de la calidad de servicio.
- Gestión de órdenes y provisión.

ORACLE [128], tras el acuerdo de adquisición de TOA Technologies presenta su servicio TOA Service Cloud que ofrece los siguientes beneficios:

- Programación optimizada de las actuaciones de los técnicos de servicio basadas en experiencia, localización y tiempo.
- Conocimiento compartido entre cliente, centro de contacto y técnico de servicio.
- Rápida realimentación para mejorar la experiencia de cliente y la eficiencia operacional.

- Completa visibilidad y optimización de la experiencia de servicio.

La empresa AMDOCS [100] tiene un *fullstack* de OSS que incluye:

- Un inventario de recursos actualizado y preciso que lleva un registro tanto de los equipos físicos como de la asignación de recursos lógicos, incluso los cambios activos y planificados.
- Una implementación de la red más rápida al utilizar diseños de plantilla estándar capaces de cumplir con los requisitos de ancho de banda para la transmisión y configuración de equipos.
- El cumplimiento de servicio automatizado para asignar recursos de forma dinámica desde los puertos físicos hasta la capacidad de servicio lógico.
- Capacidades integrales para la experiencia de red de clientes que controlan y evalúan la calidad de la experiencia por parte del usuario final.

También se pueden usar técnicas de *Data Mining* (minería de datos) para reconocer patrones en las ocurrencias de alarmas. Los análisis de tendencias necesitan encontrar dependencias a largo plazo entre las alarmas que aparecen más frecuentemente. Klemettinen et al. [125] describen un sistema basado en el conocimiento denominado Telecommunication Network Alarm Sequence Analyzer (TASA), en el que se han aplicado técnicas de minería de datos para estos fines. El sistema consiste en una serie de reglas. En primer lugar, una enorme base de datos de alarmas fue analizada *off-line* para descubrir las relaciones y conexiones temporales entre todas esas alarmas. El conjunto inicial de reglas fue definido en un primer momento y pasado al análisis de un conjunto de expertos en la materia, los cuales seleccionaron las reglas más interesantes y desecharon el resto. Las reglas elegidas fueron convertidas en reglas de correlación y aplicadas a la identificación de los fallos, ya en tiempo real.

Otra aproximación se describe en [124], donde los autores proponen un algoritmo denominado FT-DPS (*Frequent Temporal Patterns of Data Stream*). El algoritmo fue aplicado en minería de datos con intervalos de tiempo variable, incluso para llevar a cabo detección de tendencias.

El desarrollo de protocolos de enrutado cada vez más eficientes produce como resultado una mejor tolerancia a fallos de la red en su conjunto. Este es otro punto de acción posible para resolver nuestra problemática, porque un mejor enrutamiento producirá como beneficio menores necesidades de restauración de caminos y circuitos. Los protocolos de enrutado necesitan ser óptimos, simples, robustos, escalables, etc., y ser capaces de proporcionar una determinada calidad de servicio (QoS). Podemos encontrar una panorámica detallada de los diferentes protocolos de enrutado en redes de telecomunicación en [126]. Los protocolos de enrutado se basan en algoritmos de amplio uso, como por ejemplo, *Ant Colony Optimization* (ACO), *Evolutionary Algorithms* (EA) y *Colmena BeeHive* entre otros.

Nuevas arquitecturas de red permiten dotar a los usuarios de servicios con ciertos niveles de rendimiento garantizados, los cuales se definen en lo que se denomina documento de Acuerdo de Nivel de Servicio o “*Service Level Agreement*” (SLA) [119]. Un Acuerdo de Nivel de Servicio representa una definición formal de alto nivel (vista a nivel de usuario) de las características de un

servicio de comunicación, mientras que la especificación de bajo nivel (a nivel de red) se obtiene traduciendo el SLA en diferentes documentos denominados Especificación de Nivel de Servicio Service Level Specification (SLS). Es clave tener en cuenta estas informaciones en los algoritmos que utilizemos para realizar una priorización de las actividades de restauración.

Tsai et al. [104] propusieron un método para medir la disponibilidad del servicio de navegación por internet y una aproximación para predecir la disponibilidad del servicio IP-VPN punto a punto, para la red IP de banda ancha de Taiwan. En su modelo, disponían de una red compuesta por varios conmutadores de acceso y varios conmutadores de agregación, conectados al final al proveedor de internet Hinet. Según sus análisis y predicciones de disponibilidad, los resultados obtenidos muestran si una red IP cumple con los requerimientos de SLA.

La heterogeneidad de una red es un problema al que hay que enfrentarse para secuenciar el orden adecuado de las acciones correctivas. Será necesario normalizar de alguna manera las diferentes componentes heterogéneas para poder compararlas en igualdad de trato. Botta et al. [131] describen la heterogeneidad respecto a terminales, redes y servicios, e introducen el concepto denominado Condición de Servicio que puede ser representada en una gráfica en tres dimensiones, como la de la siguiente figura:

Figura 35: Condiciones de los servicios en un gráfico 3D.

La heterogeneidad de los terminales se refiere a los diferentes dispositivos que los usuarios utilizan para conectarse a la red, tales como ordenadores, PDAs (Personal Digital Assistants) o teléfonos móviles inteligentes (Smartphones). Respecto a la heterogeneidad de la red, incluso si sólo consideramos como dinámicamente variable la parte más cercana al usuario (red de acceso), tenemos un gran número de opciones con las que tratar, por ejemplo, acceso por cable (LAN, xDSL, GPON, ...), sin cable (WLAN, Bluetooth,...), redes móviles (GPRS, EDGE, UMTS,...), entre otras que podríamos tener en cuenta.

La heterogeneidad de los servicios la encontramos en que los servicios pueden tener diferentes características en términos de información transportada (audio, vídeo, ...), de formato (codificación, compresión, ...) y de tipología (síncronos, asíncronos, transaccionales, ...). Un ejemplo de red heterogénea lo encontramos en la siguiente figura. El concepto de Condición de Servicio fue introducido para establecer un marco en el que diferentes condiciones de servicio están relacionadas con diferentes parámetros de calidad de servicio (QoS), para una más sencilla evaluación de las prestaciones de la red.

Figura 36: Un ejemplo real de red heterogénea.

Otra arquitectura para un sistema de gestión de red (*network management system*, NMS) capaz de gestionar una red heterogénea está descrito en [135]. La funcionalidad del NMS en cuestión, incluye una representación de red, gestión de conexiones extremo a extremo y gestión de fallos. La arquitectura es flexible y soporta múltiples dominios de gestión en paralelo, con interfaces OSI y CORBA. El nivel de agregación superior, sería un sistema de gestión a nivel de servicio, que supone una abstracción del nivel de red. Para construir esa estratificación, en capas, son necesarias interfaces de integración como la descrita en [119].

En el mercado existen muchas soluciones para gestión de redes de telecomunicación, tales como ANSAwise [126], sistema Sinergia de CSELT [136], ALLINK Operations Coordinator de NYNEX [136], o la solución que se tomó en su día para gestionar la planta JDS de Telefónica de España, descrita en [120]. La disponibilidad de un buen sistema de gestión integrado a nivel de red es el punto de partida para poder tener una visión de conjunto global de todos los elementos que deben ser supervisados. Si además posee un inventario unificado y relacionado será fácil obtener los listado de servicio afectado (entidades afectadas) por un cierto problema o corte de red. Y esto es precisamente el punto de partida que necesitan los algoritmos de restauración propuestos en este trabajo.

En cuanto a los servicios residenciales de banda ancha, que se prestan a través de un acceso fijo (par de cobre), se caracterizan por tener un único punto de acceso a la red. En la red de acceso no hay enrutado alternativo: el bucle de abonado de un cliente residencial se conecta a un único puerto de un equipo multiplexor de acceso (DSLAM). Y lo mismo ocurre en las nuevas redes de acceso óptico pasivo (GPON), que posibilitan servicios de mucho mayor ancho de banda: el pelo de fibra que

llega al domicilio del cliente se conecta a un único puerto de un equipo de acceso óptico (OLT). En este caso el papel del equipo concentrador de accesos lo lleva a cabo el equipo Optical Line Termination (OLT), tal y como se describe en [114].

En ambos casos si el puerto tiene un fallo se interrumpirá el servicio del cliente conectado a dicho puerto. Puesto que los emplazamientos en los que están instalados los equipos normalmente no están atendidos por ningún personal (son edificios de centrales desatendidas o armarios que se encuentran en cámaras de registro, en la calle), la aparición de un fallo en uno de esos equipos hace necesario el desplazamiento de un técnico al lugar concreto en el que esté instalado [104]. La reparación más común consiste en cambiar la conexión del bucle de abonado del puerto actual (que está en fallo) a otro puerto del equipo de acceso que sí funcione (el puerto destino debe estar libre y operativo). Este cambio de conexión es una operación que se debe realizar manualmente, en el repartidor de conexiones. El puerto destino será elegido por el operador técnico apoyándose en la información que le prestan los sistemas de inventariado de planta que posea la compañía.

Los desplazamientos de los operadores técnicos para realizar cada una de las reparaciones generan un coste para la compañía. Los fallos pueden ocurrir en cualquier punto de la red, y evidentemente la cantidad de operadores en una compañía es limitada. Por tanto se plantea la necesidad de tener un algoritmo que optimice las rutas de desplazamiento de los operadores, para conseguir un ahorro global de costes. Lo ideal es poder reparar todos los fallos que existan en un determinado emplazamiento geográfico, con un único desplazamiento de un operador. Pero, al mismo tiempo, no todos los fallos tienen la misma importancia, depende de si el cliente ha interpuesto o no una reclamación por pérdida de servicio, y del tiempo que haya pasado desde la interposición de la misma. Otros factores también influyen, como la existencia de clientes preferenciales, la cuantía de las compensaciones económicas al cliente por el corte del servicio, etc. Un ejemplo de aplicación de un algoritmo de priorización, en la red de acceso, teniendo en cuenta todos estos factores, puede encontrarse en [56].

4.2.2. Elección de un producto comercial

Una vez que hayamos hecho un recorrido por la oferta comercial que existe en productos de este tipo se nos plantea la decisión (de nuevo un problema de decisión) de la elección de uno de esos productos.

Partamos de la base de que poseemos una cierta libertad de elección, es decir, no se trata de una imposición de un cierto producto, proveniente de algún centro decisor de más alto nivel. Sin entrar aquí a debatir cuál es el aspecto más importante o el peso que tendría cada uno en un problema real de decisión, se deberían tener en cuenta los siguientes factores:

- Cantidad de trabajo extra necesario para la configuración del producto de cara a integrarlo en el mapa de sistemas y cumplir con las necesidades de las áreas usuarias.
- Coste de la integración por adaptaciones en el resto de sistemas. Es decir, aparte de los costes de configuración del propio producto hay que tener en cuenta las modificaciones que pudieran ser necesarias en los sistemas presentes en el mapa de sistemas actual, para poder cumplir con el objetivo de integración prefijado.

- Calidad de la documentación aportada por el producto. Normalmente la documentación no suele ser el punto de fuerte de los productos. En general a un desarrollador le gusta programar, pero no le gusta escribir y documentar cómo ha hecho las cosas. Eso hace que la documentación la escriban personas diferentes con las consiguientes deficiencias que ello conlleva.
- Disponibilidad de consultores expertos con conocimiento profundo sobre el producto. Aún en el caso de disponer de una excelente documentación siempre surgirán dudas sobre determinados aspectos y ahí se hace insustituible el poder disponer de asesoramiento de alguien experto en el producto comercial.
- Casos de éxito. Conocer casos de éxito de implantación de un producto en otros clientes con necesidades similares a nuestro caso ayuda a tener más confianza sobre la utilización de un producto concreto.

4.3. Compañías de servicios de integración

La mayoría de las grandes empresas que venden productos de gestión de red, también ofrecen la posibilidad de que se les contrate trabajos de integración para configurar o adaptar su producto a una situación concreta. Evidentemente la mejor manera de vender un producto es ayudar a implantarlo, suponiendo además esta tarea un ingreso extra.

Aparte de estas, existen empresas que no poseen productos propios pero que sí poseen conocimientos sobre esta problemática y experiencia en desarrollos informáticos. Estas empresas ofrecen sus servicios de integración, normalmente a precios muchos más competitivos que los propios fabricantes de los productos, lo que hace que a veces el cliente se decante por una solución de este tipo para su problema de integración.

A veces el cliente opta por una solución mixta: contrata los servicios de una empresa de integración (más barata) pero no renuncia por completo a contratar un mínimo soporte a la implantación, a la empresa a la que se le compra el producto comercial. En definitiva siempre la restricción del coste hay que tenerla presente.

Sin ánimo de pretender abarcar todas las compañías mundiales que se dedican a este negocio, sin sólo centrándonos en nuestro país, España, el principal cliente de integraciones de este tipo es el mayor operador de telecomunicaciones que tenemos: Telefónica. Debido a su expansión internacional, principalmente por Latinoamérica, todas las filiales de Telefónica en los diferentes países también presentan las mismas necesidades sistémicas. De hecho muchas soluciones que se implantan en Telefónica de España son luego exportadas a las filiales internacionales.

Y las compañías de servicios de integración van donde esté Telefónica, por lo que muchas compañías españolas de este sector también tienen oficinas repartidas por el mundo.

Tampoco voy a juzgar si una compañía es mejor que otra, simplemente mencionaré que existen y que han trabajado en muchos proyectos de gestión de red, algunos con más éxito y otros con menos. Por ejemplo tenemos a INDRA, Tecsidel, Deloitte, Accenture, Efron, COMARCH, Oracle, Huawei, Axpe consulting, Inelcom, Altran, Oesia, CGI, Adecco, Eulen, Everis, Ericsson, TCP, Entel, AIRON, Sogeti, etc.

5. ALGORITMOS PROPUESTOS PARA LA PRIORIZACIÓN DE ACCIONES DE MANTENIMIENTO

En el presente capítulo nos centraremos en resolver el problema de priorizar el orden en que se restauran los caminos y circuitos dañados por una incidencia dentro de una red troncal de transporte, de una operadora de telecomunicaciones. Estamos ante un típico problema de investigación operativa sobre el que aplicaremos algoritmos de teoría de la decisión.

Tras un planteamiento detallado del problema y de todos los factores que influirán en la toma de decisión, en primer lugar se acomete una solución basada en Métodos Multicriterio Discretos, concretamente con el uso de ELECTRE I y AHP. A continuación se realiza una propuesta de solución basada en Redes Neuronales (con dos aproximaciones diferentes al problema). Por último se utiliza un método basado en la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), adaptado a un problema de permutación de enteros (ordenación), y con una forma particular de evaluar la mejor posición global del enjambre.

Los primeros métodos aplicados utilizan todas las mismas alternativas discretas de ordenación, con el objetivo de poder realizar comparaciones entre ellos, en las mismas condiciones. Los dos últimos, en cambio, no trabajan con alternativas de ordenación predefinidas, sino que proporciona como salida un orden completo de entidades, que puede ser cualquiera.

Aunque restringir la solución a un conjunto de alternativas discretas de ordenación supone eliminar un alto grado de libertad en la obtención de una ordenación óptima, lo que se ha buscado es dar respuesta a una problemática planteada durante la participación del autor en la implementación de un sistema mientras trabajaba para Telefónica.

Por otro lado, desde un planteamiento más global, podríamos haber utilizado otros algoritmos, quizá algunos más adecuados que estos. La elección ha respondido, en parte, a un objetivo didáctico. El autor de este trabajo ha pretendido afrontar el mismo problema desde perspectivas bastante distantes entre sí para, por último, realizar una comparación entre todas.

5.1. Planteamiento del problema

Un corte de un cable puede afectar a miles de circuitos a la vez, lo cual significa miles de clientes afectados a los cuales la operadora había prometido unos estándares de calidad de servicio. Si la operadora no es capaz de restablecer el servicio en los términos en los que acordó el contrato con el cliente, sufrirá una penalización económica, y lo que es peor, puede hacer que el cliente se cambie de compañía.

Si hablamos de que el cliente de esos servicios sea a la vez una gran compañía, los efectos pueden ser desastrosos para la operadora.

Si se ha realizado una buena planificación de la red, con caminos alternativos suficientes, se pueden minimizar los efectos de un corte. En cualquier caso, cuando se produce un corte es necesario disponer de los mecanismos de supervisión adecuados para localizar con precisión el problema. Ambos aspectos ya han sido tratados por este autor en [127].

Figura 37: Corte de un cable en la red de Transporte

La reparación física de un cable (que supondría resolver el problema) no es inmediata. Requiere desplazar a un equipo de reparación al lugar físico en que se haya producido la rotura, para intentar repararlo. A veces la reparación del cable físico ni siquiera es posible (hay cables de muy difícil acceso, como los submarinos), y en su lugar se necesita tender un tramo entero nuevo de cable que sustituya al anterior. Es decir, es una operación que en el mejor de los casos puede llevar horas, pero que podría prolongarse días.

Por tanto para resolver una incidencia de este tipo normalmente se usan técnicas de reencaminamiento de tráfico, aprovechando las posibilidades que proporcionan las redes de transporte actuales. Este reencaminamiento puede llevarse a cabo sobre circuitos individuales o sobre caminos de mayor velocidad (que soportan varios circuitos), e implica una actuación de un trabajador de mantenimiento sobre un sistema de control de la red. En cualquier caso, siempre será una actuación más rápida que la reparación física del cable.

Así pues, tenemos un departamento de mantenimiento de la operadora que estará compuesto por un determinado número de trabajadores. Estos trabajadores tendrán la misión de ir restaurando tráfico o reparando cortes físicos en la planta. Sólo nos falta que cada trabajador sepa el circuito, camino o cable por el que tiene que empezar a reparar, de todos los que estén afectados en un momento dado.

Intuitivamente se pone de manifiesto que para la operadora de la red es mucho más importante resolver el corte de un circuito que comunica una oficina bancaria con su central, que resolver el

corte de un circuito que proporciona el servicio de acceso a internet a un cliente particular. Y al igual que esto hay muchas más características que diferencian unos caminos y circuitos de otros.

En definitiva surge la necesidad de priorizar (ordenar) qué caminos y circuitos (e incluso cables) se deben restaurar primero y cuáles después.

5.2. Objetivo

Se persigue la elaboración de un algoritmo que ordene de mayor a menor prioridad todos los circuitos/ caminos cuyo servicio esté afectado en un momento dado. En función de esa prioridad los trabajadores del departamento de mantenimiento de la operadora realizarán las acciones oportunas para ir recuperando cada una de esas entidades afectadas.

Puesto que los cortes se producen en la red en momentos aleatorios del día, el algoritmo deberá ser ejecutado, con una cierta periodicidad, para obtener nuevas ordenaciones que tengan en cuenta los nuevos circuitos que se hayan podido ver afectados por un corte.

El objetivo global que debe conseguir el algoritmo de priorización es escoger la mejor alternativa de ordenación que minimiza todos los costes identificados en los siguientes apartados. Es decir, en definitiva, la métrica utilizada para comparar los resultados de los diferentes algoritmos o alternativas es una métrica basada en costes. Lo que se quiere es que el departamento de mantenimiento de la Operadora funcione de la manera más eficiente posible, solucionando todos los problemas que se le plantean, y con un coste global mínimo.

Por ello, en primer lugar, lo que se describe a continuación es un planteamiento de toda la información que van a utilizar los algoritmos de optimización presentados. Esta información son características extraídas de cada uno de los caminos o circuitos cortados, a lo que se une la manera en que dichas características van a influir en el coste global de cada alternativa de ordenación.

5.3. Información considerada

Evidentemente hay que poner límites a los datos que van a intervenir en los métodos y simulaciones propuestas en este trabajo. No podemos incorporar un listado interminable de factores que vayan a influir en el algoritmo de ordenación.

De todos los atributos o características que tiene cada circuito o camino, para el funcionamiento de los algoritmos propuestos, sólo se tendrán en cuenta los siguientes:

- Categoría del Cliente
- Calidad de Servicio contratada
- Velocidad
- Precio
- Tipo de Trazado
- Servicios críticos.
- Incomunicaciones de otros servicios (Telefonía, Internet, TV)
- Existencia de reclamaciones

- Relaciones de contención entre caminos y circuitos

La elección de esta información relevante ha sido una decisión del autor de este trabajo a partir de su conocimiento del problema en el entorno de una operadora de telecomunicación

Cada uno de estos atributos se describen más detalladamente en los siguientes apartados.

Categoría del Cliente del circuito

Esta característica es aplicable a los circuitos que la operadora directamente vende/alquila a clientes externos.

Supondremos que cada cliente tendrá asignada una categoría que indicará el volumen de negocio que tiene con la operadora. Los clientes con mayor volumen de negocio deberán ser tratados “mejor” por la Operadora, puesto que si alguno de ellos está descontento con el servicio y decide rescindir su contrato esto supondría un cese de ingresos apreciable. Supondremos que existirán 4 valores de categoría, desde el valor 0 (clientes residenciales con pocos privilegios) hasta el valor 3 (grandes empresas con gran volumen de negocio con la operadora). Asociadas a estas categorías se recogen en la siguiente tabla los volúmenes de negocio que suponen para la operadora cada uno de los clientes de cada una de estas categorías, tomando como referencia el volumen de negocio de un cliente de categoría 0.

<i>Categoría</i>	<i>Tipo de Cliente</i>	<i>Volumen Relativo de Negocio</i>
0	Residencial	1
1	Residencial “Plus”	2
2	Pequeña y Mediana Empresa	5
3	Gran Empresa	20

Calidad de Servicio contratada

Cada circuito tendrá una calidad de servicio contratada por el cliente, cuyo incumplimiento repercutirá en penalizaciones a la operadora que presta el servicio. Por ejemplo, la recomendación M.1040 describe características de calidad de los circuitos [23].

Existirá un catálogo de calidades que especificará las penalizaciones que sufrirá la operadora conforme el tiempo que lleve cortado un circuito vaya superando ciertos umbrales predefinidos (tiempo que se referencia a cada día natural, es decir a cada 24 horas). Manejaremos la siguiente tabla de calidades de servicio y penalizaciones, las cuales vendrán medidas en función del precio mensual (PM) de alquiler del circuito que cobra la operadora:

Calidad de Servicio	Tiempo de indisponibilidad	Penalización
0	cualquiera	0
1	Entre 0 y 1 hora	PM
1	Más de 1 hora	2 * PM
2	Entre 0 y 0,2 horas	PM
2	Más de 0,2 horas	PM+ Horas*PM

Evidentemente, cuánto mayor sea la calidad de servicio mayor será el precio que tiene que pagar el cliente por el alquiler del circuito.

Velocidad

Con el término velocidad nos referimos a la capacidad de transmisión de información por segundo, es decir, a la velocidad binaria (cantidad de bits por segundo) del circuito.

A mayor velocidad más importante será el camino o circuito. Es decir, a mayor velocidad normalmente el circuito será más caro, y por tanto las penalizaciones por el cese de servicio serán más altas para la operadora.

Como ejemplo de velocidades binarias típicas tendríamos las siguientes:

- 2 Mbit / seg.
- 8 Mbit / seg.
- 34 Mbit / seg.
- 140 Mbit / seg.
- 622 Mbit / seg.
- 2500 Mbit / seg.

Precio

Los circuitos alquilados como su propio nombre indica tienen un precio de alquiler, que consideraremos mensual, y al que denominaremos “PM”.

Consideraremos que el precio de alquiler mensual de un circuito sólo depende de dos variables:

- Velocidad binaria (V) medida en Mbit / seg.
- Calidad de Servicio (QoS), cuyos valores posibles están catalogados en una tabla anterior.

Teniendo en cuenta estos factores, supondremos que el precio mensual de un circuito responde a la siguientes fórmula:

$$PM = (1 + V/3) + QoS * V/10 \text{ unidades monetarias.}$$

Así un circuito de velocidad 2 Mbit/seg y calidad de servicio 1 costaría al mes $PM = 1 + 0,67 + 0,2 = 1,87 \text{ um}$; y uno de 34 Mbit/seg y calidad de servicio 2 costaría: $PM = 1 + 11,3 + 6,8 = 19,1 \text{ um}$.

La elección de esta fórmula de cálculo del precio es una aproximación propuesta por el autor de este trabajo, para simplificar las simulaciones. Esta simplificación, como el resto que se han adoptado en los siguientes apartados, no resta validez al planteamiento del problema. En un caso real la fórmula del cálculo del precio sería diferente, puede influir descuentos especiales (por volumen, por condiciones particulares, etc.), pueden existir tarifas planas, etc., pero en cualquier caso lo importante es que debe existir una formulación concreta del cálculo del atributo, y deben existir datos suficientes para su cálculo dentro del listado de entidades cortadas con las que se inicia el algoritmo.

En este planteamiento, usaremos el precio en el cálculo de las penalizaciones por incumplimiento de la calidad de servicio.

Tipo de Trazado

Por trazado de un circuito/camino se entiende como la sucesión de recursos de red de su capa servidora que conjuntamente permiten comunicar el flujo de información de ese circuito/camino entre sus dos extremos.

De todo el trazado, para el problema que tratamos de resolver, sólo nos interesa si existen o no "puentes físicos". Si el camino/circuito tiene "puentes físicos" en su trazado, su reencaminamiento no podrá realizarse remotamente desde un centro de gestión (opción más económica) sino que implicará el desplazamiento de un trabajador para realizar una operación manual en planta, aumentando por ello el coste de la restauración.

Servicios críticos

Independientemente de la categoría que tenga un cliente, existirán ciertos circuitos que serán considerados como críticos por soportar servicios esenciales. A igualdad del resto de propiedades, un circuito con una marca de crítico debería restaurarse más rápidamente que un circuito de un cliente que tuviese la máxima categoría.

Supondremos que cualquier circuito puede estar etiquetado con un valor de criticidad entre los siguientes:

- Criticidad 2: normalmente será usado para circuitos de organismos oficiales, como la Policía, Hospitales, Defensa, etc.
- Criticidad 1: normalmente usado para circuitos de control de la propia red de telecomunicación
- Criticidad 0: para el resto.

Incomunicación de otros Servicios

En este apartado nos centramos en los circuitos que no se han vendido/alquilado a clientes externos, sino que son utilizados como “soporte” para proporcionar otros servicios finales, que son los que sí se venden a los clientes.

Entre los circuitos de este tipo tenemos:

- Circuitos de enlace entre centrales de conmutación tradicionales.
- Circuitos de enlace entre equipos conmutadores de paquetes (red troncal de paquetes).
- Circuitos de enlace entre equipos conmutadores de paquetes (accesos ADSL: navegación por internet de clientes).
- Circuitos de enlace entre equipos conmutadores de paquetes (distribución de televisión).

El corte de uno de estos circuitos puede provocar la pérdida de otro servicio (servicio de telefonía, de navegación por internet, etc.) en un gran número de clientes. Por tanto hay que tener en cuenta esta característica para determinar la urgencia en la restauración de estos circuitos.

Supondremos que una característica de cada circuito es si provoca alguna afectación en alguno de los servicios siguientes, y la cantidad de usuarios a los que afecta:

- Cantidad de afectados en el Servicio de telefonía básica.
- Cantidad de afectados en el Servicio de navegación por internet por ADSL.
- Cantidad de afectados en el Servicio de distribución de televisión.

En los circuitos de este tipo se desconocerá la identificación concreta de todos los clientes afectados (no se sabrá su Categoría, ni su Calidad de Servicio, etc.) ya que como atributo directo del circuito sólo figura la cantidad de los clientes afectados.

Existencia de reclamaciones

Cuando un cliente detecta que se le ha dejado de prestar un servicio, lo normal es que reclame por ello a la operadora, utilizando los canales que disponga para ello (normalmente un Servicio de Atención al cliente).

Por el contrario, puede haber clientes afectados por una incidencia de red, que no se hayan dado cuenta de que están afectados, porque, por ejemplo no están usando el servicio en ese momento.

Evidentemente, es más urgente restablecer el servicio de los clientes que han cursado una reclamación, con respecto a los que no lo han hecho.

Por otro lado también es importante el tiempo que lleva activa una reclamación, puesto que repercute en la sensación de eficiencia que percibe el cliente, con respecto a la capacidad de la Operadora de resolver “su problema”.

En definitiva, de cada circuito afectado por la incidencia es necesario conocer si tiene activa una reclamación de cliente, y en caso afirmativo también se necesita conocer la fecha y hora en que el cliente puso la reclamación.

Relaciones de contención entre caminos y circuitos

La estructura de la red de transporte es una estructura jerárquica, donde existen relaciones de contención entre las diferentes entidades. Así por ejemplo, por un único cable de fibra óptica pueden transportarse varios caminos de una alta tasa binaria, y cada uno de esos caminos puede transportar decenas o cientos de circuitos de menor tasa binaria.

Figura 38: Contención entre capas de transporte

Esto significa que a la hora de solucionar una avería en la red hay que decidir si es más óptimo reparar un cable cortado (aunque cueste más tiempo y dinero) o reencaminar uno a uno los cientos o miles de circuitos que transporta.

De cara al algoritmo que pretendemos utilizar en el presente documento, únicamente tendremos en cuenta la relación de contención entre los circuitos y sus caminos inmediatamente servidores. Es decir, a partir de la lista de circuitos afectados por la avería podrá obtenerse una lista de sus caminos servidores afectados. Cada uno de estos caminos servidores contendrá varios (del orden de decenas normalmente) circuitos.

Puesto que se trata de analizar esos caminos servidores se hace necesario definir qué atributos tendrán esos caminos en función de los atributos de sus circuitos contenidos. Tendremos en cuenta únicamente los siguientes atributos de los caminos:

- Cantidad de circuitos contenidos. Es la suma total de todos los circuitos contenidos en el camino.
- Cantidad de circuitos críticos contenidos. Es la suma de todos los circuitos contenidos cuyo valor de Criticidad sea distinto de 0.
- Cantidad de circuitos reclamados contenidos. Es la suma de todos los circuitos contenidos en el camino que tienen alguna reclamación de cliente activa (independientemente de la fecha/hora de la reclamación).
- Cantidad de afectados en el Servicio de telefonía básica. Es la suma de todos los afectados en el servicio de telefonía por todos los circuitos contenidos en el camino

- Cantidad de afectados en el Servicio de navegación por internet por ADSL, por todos los circuitos contenidos en el camino.
- Cantidad de afectados en el Servicio de distribución de televisión, por todos los circuitos contenidos en el camino.

El cálculo de todas estas cantidades supone un preprocesamiento en el que se deben consultar todos los circuitos contenidos en el camino, y de cada circuito se debe consultar sus atributos de criticidad, de estado de reclamación, de afectación al servicio de telefonía, de afectación del servicio de internet y de afectación del servicio de televisión.

5.4. Aplicación del Método Multicriterio Electre I

Una vez expuesto el problema en el capítulo anterior, en términos de "variables" que intervienen en el mismo, en el presente capítulo se llevará a cabo la aplicación de un método multicriterio.

El método elegido es el ELECTRE I, ya que de lo que se trata es de encontrar la mejor alternativa sin importar la ordenación relativa del resto de alternativas. La aplicación de este método fue publicada por el autor de este trabajo en [55].

Para ello, en primer lugar hay que identificar qué variables van a constituir los "criterios" utilizados, según la terminología de los métodos multicriterio.

A continuación de la identificación de criterios se realiza la identificación de las alternativas de ordenación de los circuitos.

5.4.1. Criterios

Los criterios (tanto en su definición como en su peso relativo) se han decidido a partir de la experiencia del autor del presente trabajo, como resultado de conversaciones con muchos responsables y colaboradores de departamentos de mantenimiento de diferentes operadoras. Cubren los aspectos principales por los que, en definitiva, se guían las decisiones en dichos departamentos. Los adoptados para el presente trabajo han sido los siguientes:

- Coste material de ejecutar la reparación. Incluye coste de desplazamientos, coste material de la instalación de nuevos cableados, soldaduras/empalmes, etc. Se mide en unidades monetarias (u.m.).
- Coste humano de ejecutar la reparación. Depende de la cantidad de personas involucradas, su sueldo y el tiempo que dediquen a la tarea. Se mide en unidades monetarias (u.m.).
- Coste directo de las penalizaciones por incumplimiento de la calidad de servicio contratada por los clientes afectados. Como ya se comentado antes, el incumplimiento de la calidad de servicio por superación de un tiempo máximo de indisponibilidad del servicio genera una penalización. Las penalizaciones consisten en rebajas en el precio de las facturas que se cobran a los clientes, o incluso en regalos de periodos de tiempo de alquiler gratuitos. Se mide en unidades monetarias (u.m.).
- Cese de ingresos por los clientes descontentos que rescinden su contrato y se cambian de operadora. Se mide en unidades monetarias por mes (u.m./mes).

- Repercusión mediática (grandes cortes de hospitales, aeropuertos). Publicidad negativa y como consecuencia, disminución de la incorporación de nuevos clientes, que se dirigirán a otras operadoras. Se mide en unidades de tiempo (minutos) refiriéndose al tiempo de incomunicación acumulado de todos los circuitos cuyo corte tiene una gran repercusión mediática.

No se ha considerado el "Tiempo invertido en la reparación" como un criterio aislado, sino que forma parte de varios de los criterios enumerados, ya que el tiempo siempre se convierte en un coste.

En cuanto a la asignación de los pesos para cada coste se ha decidido que sea la recogida en la siguiente tabla:

	Coste material	Coste humano	Penalizaciones	Cese de ingresos	Repercusión mediática
Peso relativo	0,14	0,16	0,08	0,25	0,37
"Más es mejor"	-1	-1	-1	-1	-1

Figura 39: Pesos relativos de los criterios

Los costes materiales y humanos tienen poco peso porque se supone que la Operadora dispone de medios suficientes para esos aspectos, máxime si se le va a proporcionar un algoritmo (el que se describe en el presente documento) que optimiza su utilización. Los dos costes se han considerado de un peso similar, aunque siendo ligeramente superior el coste humano.

El menor peso lo tendrá el coste de las Penalizaciones, porque en general los cortes de servicio que provocan penalizaciones deberían afectar a un mínimo número de usuarios comparado con el total de clientes de la operadora, y normalmente no supondrá una cantidad importante de dinero. La importancia de las Penalizaciones se ha considerado aproximadamente la mitad de los Costes materiales / humanos.

Por encima de todos los costes anteriores se sitúa el Cese de Ingresos por cambio de operador, ya que la pérdida de clientes es uno de los problemas más importantes con los que se enfrentan las

operadoras actuales. Su importancia se ha considerado como aproximadamente el doble de los costes materiales / humanos.

Y el criterio que mayor peso tiene de todos es el criterio de la Repercusión mediática, en parte, debido a la sociedad de la información en la que vivimos inmersos que posibilita una rápida y amplia difusión de cualquier noticia, y en parte debido al entorno de competencia en el que se desarrolla el sector de las telecomunicaciones. En el presente algoritmo se le ha dado una importancia de más de un tercio del total.

Todos los criterios son del tipo “a más peor” (índice = -1), es decir, cuánto mayor es la magnitud de cualquiera de ellos, peor es la alternativa de cara a la solución óptima.

La asignación de estos pesos relativos, que ha sido usada en la aplicación de ELECTRE I, ha sido fijada únicamente a partir de la decisión del autor, basado en su experiencia y en su conocimiento del negocio de las telecomunicaciones. Aún así, veremos en el apartado de aplicación de AHP, que un procedimiento más analítico de asignación de pesos proporciona como resultado unos valores muy parecidos.

Evidentemente los criterios elegidos para el problema podrían haber sido otros diferentes en lugar de estos cinco, y el resultado de la aplicación de los algoritmos sería entonces diferente. Aparte de cubrir los aspectos más importantes lo que se ha buscado es que tanto los criterios, como las fórmulas que rigen el cálculo de su valor, sean fáciles de explicar a los decisores. De esta manera se facilitaría la adopción de los mismos por parte de los decisores.

Los cuatro primeros criterios con cuantitativos por definición, miden un coste en una cierta unidad monetaria. Sin embargo el quinto criterio, aunque se ha definido sobre él una unidad de medición (minutos de incomunicación de los cortes de gran repercusión), realmente en el fondo es un criterio cualitativo. Es muy difícil cuantificar el impacto que puede tener para una compañía toda la publicidad negativa derivada de una situación de un fallo importante de sus servicios. El criterio se ha modelado como cuantificable para poderlo incluir en las simulaciones, pero es una futura línea de acción el profundizar sobre un modelo más detallado del mismo.

5.4.2. Alternativas

Cada alternativa se ha establecido como una "solución completa de ordenación", es decir, debe contemplar una regla de ordenación que permita ser aplicada a todos los circuitos que estén afectados por una incidencia en ese instante.

En un principio se podría plantear que cada alternativa fuera cada uno de los listados ordenados de circuitos afectados. Por ejemplo esto sería factible para un valor muy bajo como $N = 3$. En este caso, si tenemos los circuitos c1, c2 y c3, tendríamos las siguientes 6 posibles ordenaciones:

- c1, c2, c3
- c1, c3, c2
- c2, c1, c3
- c2, c3, c1

- c3, c1, c2
- c3, c2, c1

Para cada una de estas 6 ordenaciones se podrían calcular los valores de los criterios definidos en el apartado anterior, y aplicar el algoritmo correspondiente para obtener la alternativa ganadora.

Sin embargo en un caso real tendremos N circuitos afectados, que fácilmente pueden ser cientos o miles. La cantidad de ordenaciones posibles de esos N circuitos es igual a todas las permutaciones de N elementos ($N!$), es decir un número muy alto de posibilidades. Por ejemplo para sólo 10 circuitos ya tendríamos más de 3 millones de posibles ordenaciones. No es viable aplicar un método multicriterio discreto con un número tan alto de alternativas, por lo que para poder aplicarlo hemos de reducir la cantidad de alternativas de ordenación a sólo unas cuantas.

La manera de reducir las alternativas es definir que cada alternativa sea una solución completa de ordenación en base a unas reglas fijas. Es decir, es una regla de ordenación, basada en atributos que poseen los propios circuitos, y que, al aplicarla, produce un listado ordenado de todos los circuitos. No cabe duda que la definición de estas reglas (y no otras) está introduciendo un sesgo en el problema, pero al menos se está introduciendo la variable de determinar cuál será la mejor solución de ordenación (lo dirá nuestro algoritmo), en lugar de aplicar una única sin haber realizado ningún otro estudio previo.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, para la tarea de restauración de circuitos, las alternativas de ordenación que se han elegido se han definido con los siguientes nombres:

- A. Mayor importancia a los críticos.
- B. Mayor importancia al tiempo de reclamación.
- C. Reclamados por categoría.
- D. Acción sobre capa servidora por criticidad.
- E. Acción sobre capa servidora por reclamaciones.

La elección de estas alternativas, y no otras, tiene su explicación. Formaban parte de las posibles soluciones barajadas durante la implementación de un sistema de ayuda a la afectación de servicios, para Telefónica, en la que el autor de esta tesis estaba participando hace años. En su día, en el equipo de implementación, no existía un acuerdo sobre cuál era la mejor alternativa de ordenación, y ese fue precisamente uno de los motivos que propició el inicio de la presente tesis doctoral.

A continuación se describe el detalle de cada una de estas alternativas, teniendo en cuenta que siempre que se tenga una situación de “igualdad” en la evaluación de dos circuitos, dentro del mismo criterio, será más importante el que tenga, por este orden, reclamaciones, o sea crítico, o tenga más velocidad o produzca más incomunicaciones, o tenga un cliente de más categoría. Así por ejemplo ante un circuito con dos reclamaciones y un crítico, el de las reclamaciones estaría en primera posición en el orden. Pero si el crítico tuviera también dos reclamaciones sería él el que estaría primero.

A. Mayor importancia a los críticos

En esta alternativa los circuitos se ordenan de la siguiente manera:

- Primero todos los circuitos marcados como críticos, usando como segundo criterio de mayor a menor velocidad.
- Después los de los circuitos de clientes particulares (empresas, no marcados como críticos), usando como segundo criterio la Categoría en orden descendente.
- Después el resto de circuitos, aplicando la ordenación por defecto: reclamaciones, o sea crítico, o tenga más velocidad o produzca más incomunicaciones, o tenga un cliente de más categoría.

B. Mayor importancia al tiempo de reclamación

En esta alternativa los circuitos se ordenan de la siguiente manera:

- Primero todos los circuitos con reclamaciones por orden de llegada de la reclamación (los que tienen reclamaciones más antiguas deben ir primero en el orden). En el caso de tener un circuito con más de una reclamación, esto hará que adelante en el orden al circuito precedente, el cual tendrá menos reclamaciones (pero más antiguas).
- Después todos los marcados como Críticos, usando como segundo criterio de mayor a menor velocidad.
- Después los de los clientes particulares usando como segundo criterio la Categoría en orden descendente.
- Después el resto, aplicando la ordenación por defecto.

C. Reclamados por categoría

En esta alternativa los circuitos se ordenan de la siguiente manera:

- Circuitos con reclamaciones ordenados por Categoría del cliente, independientemente del tiempo que lleve activa la reclamación, y de la cantidad de reclamaciones (sólo se tienen en cuenta en caso de igualdad).
- Después todos los críticos de mayor a menor Categoría.
- Después los de los clientes particulares por Calidad de servicio. A igualdad de Calidad se ordenará por Categoría. Y a igualdad de Calidad y Categoría, se ordenarán por velocidad.
- Después el resto, aplicando la ordenación por defecto.

D. Acción sobre capa servidora por criticidad

En esta alternativa no se trata de ordenar únicamente los circuitos de forma aislada sino que trata de ordenar previamente los caminos servidores completos que estén incluidos en el corte pasos de la ordenación son:

- Primero los caminos que tuvieran mayor número de circuitos Críticos, independientemente del resto de atributos del camino y de los circuitos contenidos.
- Después los caminos que tuvieran mayor número de reclamaciones (acumulado de posibles reclamaciones sobre el camino más la suma de las reclamaciones sobre todos los circuitos contenidos).
- Resto de caminos servidores (que no contienen ni circuitos críticos ni con reclamaciones) ordenados por cantidad de circuitos que contienen. Ante igualdad de cantidad, se ordena por cantidad de circuitos que atienden a la ordenación por defecto de los parámetros no evaluados aún: más velocidad o produzca más incomunicaciones, o tengan más clientes de más categoría.
- Resto de circuitos no contenidos en ningunos de los caminos servidores, usando la ordenación por defecto: reclamaciones, o sea crítico, o tenga más velocidad o produzca más incomunicaciones, o tenga un cliente de más categoría.

E. Acción sobre capa servidora por reclamaciones

En esta alternativa también se ordenan en primer lugar los caminos servidores afectados, siendo la ordenación de la siguiente manera:

- Serían primero los caminos que tuvieran mayor número de circuitos con reclamaciones activas. A igualdad de cantidad, los que la suma de los tiempos de reclamación sea mayor.
- Después los caminos con mayor número de circuitos críticos.
- Después caminos con más de 1000 usuarios de internet incomunicados.
- Caminos con más de 1000 usuarios de telefonía incomunicados.
- Resto de caminos ordenados por cantidad de circuitos que contienen. Ante igualdad de cantidad, se ordena por cantidad de circuitos que atienden a la ordenación por defecto de los parámetros no evaluados aún: más velocidad o produzca más incomunicaciones, o tengan más clientes de más categoría.
- Resto de circuitos no contenidos en ningunos de los caminos servidores, usando la ordenación por defecto: reclamaciones, o sea crítico, o tenga más velocidad o produzca más incomunicaciones, o tenga un cliente de más categoría.

5.4.3. Cuantificación de los criterios

En este apartado se describen las funciones de utilidad o fórmulas “matemáticas” que permiten calcular la magnitud de cada una de las alternativas, para cada uno de los criterios. Como entrada para este cálculo se tomarán los atributos identificados de cada circuito / camino, y la ordenación relativa de los mismos que impone cada alternativa.

El resultado de todas estas fórmulas será la obtención de unos determinados valores para la **matriz decisional**, la cual tiene las siguientes filas y columnas:

Altern.	Coste material (u.m.)	Coste humano (u.m.)	Penalizaciones (u.m.)	Cese de ingresos (u.m./mes)	Repercusión mediática (min.)
A					
B					
C					
D					
E					

Como nomenclatura de las variables que se aparecen en las funciones de utilidad usaremos, entre otras, las siguientes:

- Trem: Tiempo de Restauración Medio, que transcurre desde que se empieza a restaurar un camino o circuito hasta que finaliza la operación.
- Tini: Tiempo que transcurre desde el inicio del corte hasta el inicio de la restauración de un camino o circuito (debido a que los operadores de restauración se están ocupando de otros caminos/circuitos hasta ese momento) .
- N: Número de operadores que trabajan en el departamento de restauración.
- Sreenc = Sueldo de un “operador de reencaminamiento”.
- Sact = Sueldo de un “operador de actuación remota”.

Coste material

La única diferencia de coste material que manejaremos se deberá al tipo de trazado del camino/circuito que se está restaurando. Si el camino/circuito tiene "puentes físicos" en su trazado, su reencaminamiento no podrá realizarse remotamente desde un centro de gestión sino que implicará el desplazamiento de un trabajador para realizar una operación manual en planta. Estimaremos que en este segundo caso el coste es 10 y en el primero es 1. Es decir, por cada circuito:

Tipo Trazado	Con puentes	Sin puentes
Coste Material	10	1

El Coste Material total de una alternativa es la suma de los Costes Materiales de restaurar todos los caminos /circuitos afectados. Evidentemente esto no depende de la ordenación relativa de los circuitos, puesto que, se arregle antes o se arregle después, si un circuito tiene puentes tendrá un coste material mayor que si no tiene puentes. Pero de lo que sí depende es de la elección de las alternativas que proponen restaurar primero los caminos servidores, ya que en estas alternativas se consigue restaurar una menor cantidad de entidades debido a las relaciones de contención que existen entre los caminos servidores y sus circuitos contenidos.

El inconveniente de restaurar un camino servidor, es que se necesita para ello más tiempo que para restaurar circuitos de la capa cliente. Por tanto, la decisión de restaurar primero un camino servidor, puede retrasar la restauración de alguno de sus circuitos clientes contenidos que podrían ser más prioritarios.

En definitiva, restaurar cuanto antes los caminos servidores disminuye la cantidad total de entidades a restaurar (puesto que los caminos servidores incluyen una cierta cantidad de circuitos clientes que también estarían cortados), pero restaura al mismo tiempo todos los caminos clientes contenidos sin distinguir las diferentes prioridades que pudiera haber entre todos ellos.

Coste humano

Para un camino/circuito que pueda reencaminarse remotamente (no posea puentes físicos en su trazado) supondremos que se necesita un "operador de reencaminamiento" cuyo sueldo es 1 unidad/minuto y que el tiempo medio que tarda en la reparación depende de la velocidad del circuito de la siguiente manera: $T_{rem} = 7$ minutos para $V < 140$ Mbit/s, y $T_{rem} = 35$ minutos para el resto de velocidades superiores (en cualquier caso esto es un ejemplo de valores que podrán ser variados durante las pruebas de ejecución). La razón de esta diferencia es que es más difícil encontrar recursos libres para reencaminar un circuito de gran velocidad porque son recursos más escasos en la planta.

Para un camino/circuito que posea puentes físicos supondremos que se necesita un "operador de actuación remota", cuyo sueldo es 0,8 unidades/minuto y que tarda en media $T_{rem} = 60$ minutos en la reparación, independientemente de la velocidad del circuito.

El Coste Humano total de una alternativa es la suma de los Costes humanos de restaurar todos los caminos /circuitos afectados. Evidentemente esto no depende de la ordenación relativa de los mismos, pero sí que varía si se eligen las alternativas que proponen restaurar los caminos servidores, en las cuales en principio se restauran menor cantidad de entidades. Por tanto aplica aquí una explicación similar a la del apartado anterior.

Coste de las penalizaciones

Los factores que influyen en el cálculo de la penalización derivada del corte de un circuito son:

- La Calidad de Servicio contratada: la calidad "0" no tiene penalización, y el resto tienen una penalización dependiente del tiempo de incomunicación.
- Tiempo que se tarda en empezar a restaurar el circuito desde el inicio del corte (T_{ini}). Hay que tener en cuenta en que nº de orden está el circuito, el tiempo tardado en todos los circuitos que están delante, y la cantidad de operadores de reencaminamiento y de actuación remota que existen en total (ya que trabajan en paralelo).

Figura 40: Influencia de la ordenación en el tiempo de restauración de un circuito

Supondremos que el departamento de mantenimiento de la operadora dispone de una cantidad fija de trabajadores ($2N$) trabajando en paralelo en las actividades de restauración. De ellos, supondremos que la mitad (N) se dedican a reencaminamiento remoto de caminos y circuitos desde centros de operación telecomandados, y la otra mitad (N) se dedican a la actuación remota.

- Tiempo medio que se tarda en restaurarlo (T_{rem}).
- El precio del circuito.

Por tanto para un circuito hay que acudir a la tabla de penalizaciones según calidad de servicio, usando ahí como tiempo la suma de $T_{ini} + T_{rem}$ de ese circuito.

Para calcular la penalización global de toda la alternativa hay que sumar las penalizaciones de todos los circuitos.

En el caso de las alternativas que proponen restaurar caminos en lugar de circuitos, todos los circuitos contenidos en el mismo camino tendrán el mismo T_{ini} y T_{rem} .

Cese de ingresos

Empezaremos calculando el cese de ingresos mensual por cada cliente que decida cancelar su contrato con la operadora. Ese cese de ingresos es precisamente el precio de la factura mensual que pague cada cliente. En principio es un dato desconocido para el presente algoritmo todos los circuitos / servicios que pueda tener contratados un cierto cliente, por ello estimaremos ese dato como el producto del precio del servicio que se ha cortado por el volumen de negocio que tenga el cliente (aunque sólo se haya cortado un circuito del cliente X , si ese cliente tiene alquilados K circuitos y decide rescindir su contrato, el cese de ingresos sería el precio conjunto de todos esos K

circuitos). El volumen de negocio lo fija la categoría del cliente que sí que es un atributo directo de cada circuito.

Es necesario diferenciar entre los clientes que directamente tienen alquilado un circuito, por el cual pagan un precio mensual (PM) ya calculado en apartados anteriores, y los clientes de los servicios de Telefonía, Internet o TV. Para estos últimos estableceremos los siguientes precios mensuales:

Servicio	Abreviatura	Precio mensual
Telefonía	P_Tlf	0,1 u.m.
Internet	P_Inet	0,3 u.m.
Televisión	P_TV	0,25 u.m.

En cuanto a la decisión de rescindir su contrato con la operadora, supondremos que un cliente la toma en función del tiempo de incomunicación de sus servicios. También influye el hecho de que el cliente haya cursado una reclamación y el tiempo que la operadora tarde en resolverla. Manejaremos dos umbrales de tiempo:

- Tmax: Tiempo máximo de incomunicación que un cliente es capaz de soportar sin tomar la decisión de darse de baja en la operadora. Será un tiempo general, aplicable a cualquier servicio que cualquier cliente pudiera tener contratado (tanto un circuito como un servicio de telefonía, internet o televisión).
- Tmax_recl: Tiempo máximo de incomunicación que un cliente es capaz de soportar, contado desde el instante en que el cliente interpuso una reclamación por dicha incomunicación. Consideraremos que es un tiempo menor que el anterior ($Tmax_recl < Tmax$) ya que si se ha interpuesto una reclamación se espera que sea atendida lo más pronto posible. Sólo es aplicable al servicio de circuitos alquilados (dado el modelado de datos que se está manejando en el presente algoritmo).

Repercusión mediática

Tal y como se ha comentado anteriormente, en el fondo se trata de un criterio cualitativo sobre el que se ha definido una unidad de medición (minutos de incomunicación de los cortes de gran repercusión), para hacerlo cuantificable y poder incluirlo en las simulaciones.

Se ha modelado el cálculo de su valor final de acuerdo a las siguientes contribuciones:

- Los circuitos marcados con un valor de Criticidad = 2. Cada uno de estos circuitos contribuye a la repercusión mediática en función del tiempo que haya estado cortado ($Tini + Trem$), según la siguiente fórmula: $Repercusión = Tini + Trem$ (minutos).
- Los circuitos que provocan grandes incomunicaciones de servicios de telefonía. Cada uno de estos circuitos contribuye a la repercusión mediática siempre que el número de usuarios incomunicados supere un umbral ($Utlf$). Y la repercusión producida por cada usuario de este tipo es $Repercusión = (Tini + Trem) / (3 * Utlf)$ (minutos)

- Los circuitos que provocan grandes incomunicaciones de servicios de internet. Cada uno de estos circuitos contribuye a la repercusión mediática siempre que el número de usuarios incomunicados supere un umbral (U_{inet}). Y la repercusión producida por cada usuario de este tipo es $Repercusión = (T_{ini} + T_{rem}) / (2 * U_{inet})$ (minutos)
- Los circuitos que provocan grandes incomunicaciones de servicios de televisión. Cada uno de estos circuitos contribuye a la repercusión mediática siempre que el número de usuarios incomunicados supere un umbral (U_{tv}). Y la repercusión producida por cada usuario de este tipo es $Repercusión = (T_{ini} + T_{rem}) / (4 * U_{tv})$ (minutos)

Así por ejemplo, si suponemos que se superan tanto los umbrales U_{tlf} y U_{inet} (siendo ambos igual a 1000) podríamos decir que tiene la misma repercusión una incomunicación de 3000 clientes de telefonía que una de 2000 clientes de internet. Y a su vez, estas dos incomunicaciones tendrían la misma repercusión que una incomunicación de un circuito de un Hospital (siendo todas las incomunicaciones de la misma duración en tiempo).

Finalmente, la repercusión total de un corte es la suma de las repercusiones de todos los circuitos cortados que entran en los supuestos anteriores.

5.4.4. Estrategia de aplicación del Método

En cada momento, la cantidad de circuitos cortados en toda la planta es diferente. Los cortes se suceden a lo largo de cada día, pudiéndose juntar hasta decenas de cortes importantes en el mismo día.

Debemos dejar claro cuál será el momento en que se aplicará el Método Multicriterio descrito en el presente documento. Dependiendo de la casuística de circuitos cortados que exista en el momento de aplicación del Método, la mejor "alternativa" para esa aplicación concreta del Método no tiene por qué coincidir con la mejor alternativa en otro instante del día.

Así pues, estas son las condiciones de aplicación:

- La decisión de aplicar el Método Multicriterio será tomada por un operador del departamento de mantenimiento. Normalmente esto ocurrirá cuando el operador sea informado de que se ha producido un corte en la planta. Si el Método ha sido aplicado una vez al comienzo de un día, pero el operador es informado de que se ha producido otro corte en la planta más tarde, el operador tendrá el poder de volver a aplicar el método si así lo considera conveniente (normalmente siempre debería hacerlo).
- El Método, para poder ejecutarse, necesita tomar como datos de entrada la identificación de todos los circuitos que se quieren ordenar. Es decir, ante un corte producido en la planta, se necesita obtener la lista de todos los circuitos afectados. Además, para cada circuito no sólo se necesita su identificación, sino que se necesita todo el conjunto de atributos que participan en las "funciones de utilidad". Si a lo largo del día se produce un segundo corte en la planta, y el operador decide volver a ejecutar el Método, se necesitará pasar como datos de entrada la lista de circuitos del primer y segundo cortes a la vez.
- El resultado de aplicar el Método Multicriterio, como ya se ha comentado antes, es una "solución completa de ordenación" de todos los circuitos. Pero con lo que se va a poner a

trabajar el Departamento de Mantenimiento es con una ordenación efectiva de circuitos, que será aquella que corresponda a la alternativa elegida.

- En cuanto al tiempo de computación, todos los pasos aquí descritos deben ejecutarse en un tiempo razonable, comparado con el tiempo que luego se tarda en ir reencaminando circuitos. Es decir, estaríamos hablando de unas pocas decenas de minutos como máximo. En este tiempo se debe conseguir:
 - Obtener la lista de circuitos de cada corte involucrado, y los atributos necesarios de cada circuito.
 - Aplicar las cinco alternativas de ordenación identificadas (A, B, C, D y E) a todos esos circuitos, de manera que se obtengan cinco Listas Ordenadas de Circuitos.
 - Ejecutar las funciones de utilidad para obtener las magnitudes de los criterios de las cinco listas ordenadas de circuitos. En estas funciones de utilidad influyen los atributos de los circuitos y la "alternativa" elegida.
 - Aplicar el Método Multicriterio para obtener la alternativa ganadora.
 - Mostrar al operador la Lista Ordenada de Circuitos que corresponda a la alternativa ganadora (la lista ya fue calculada antes de aplicar el Método).

5.4.5. Ejemplo de aplicación con datos reales

En este apartado se muestra un ejemplo concreto de aplicación del método ELECTRE I tal y como se ha descrito en el presente documento, con datos de circuitos reales. El resultado es, como ya se ha comentado, la elección de la mejor alternativa de ordenación de las acciones de restauración.

Circuitos de partida

Como ejemplo se han tomado datos de una incidencia de red que afecta a 145 circuitos de diferentes velocidades, contenidos en un total de 22 caminos servidores. Parte de esa información se muestra en la siguiente tabla:

Entidades Afectadas

Hora de inicio del corte: 21:37 h

Identif. Circuito	Nombre del Cliente	Calidad de Servicio	Descrip. Categoría
28650001002479	SAM	0	RESIDENCIAL
E32	TELEFÓNICA	0	Sin categoría
28650001000906	SAM	2	RESIDENCIAL
E33	TELEFÓNICA	0	Sin categoría
28100001205456	TELEFONICA DE ESPAÑA S.A.U.	0	Sin categoría
E34	TELEFÓNICA	0	Sin categoría
28100001239322	TELEFONICA DE ESPAÑA S.A.U.	0	Sin categoría

ALGORITMOS DE DECISIÓN PARA PRIORIZAR LAS ACCIONES DE RESTAURACIÓN EN EL MANTENIMIENTO DE REDES

E35	TELEFÓNICA	0	Sin categoría
28110001017322	TELEFONICA DATA ESPA A S.A.	0	GRAN EMPRESA
28100001327421	TELEFONICA DE ESPAÑA S.A.U.	0	Sin categoría
28100001385350	TELEFONICA DATA ESPA A S.A.	0	GRAN EMPRESA
28140001020419	TELEFONICA DATA ESPA A S.A.	0	GRAN EMPRESA
8100001413370	TELEFONICA DE ESPAÑA S.A.U.	0	Sin categoría
28100001413371	TELEFONICA DE ESPAÑA S.A.U.	0	Sin categoría
E36	TELEFÓNICA	0	Sin categoría
E37	TELEFÓNICA	0	Sin categoría
28100001429902	TELEFONICA DE ESPAÑA S.A.U.	0	Sin categoría
28100001265012	RED ELECTRICA TELECOMUNICACIONES, S.A.	2	GRAN EMPRESA
28650001016010	BANCO ESPAÑOL DE CREDITO 1	0	GRAN EMPRESA

Sobre todas esas entidades se ha aplicado todo el tratamiento descrito en el capítulo anterior para calcular los valores de los criterios correspondientes a las cinco alternativas de ordenación manejadas.

Matriz decisional inicial

Para los datos del ejemplo considerado, y una vez aplicadas las funciones de utilidad sobre ellos, el resultado son los siguientes valores para la **matriz decisional inicial**:

Alternativas	Coste material (u.m.)	Coste humano (u.m.)	Penalizaciones (u.m.)	Cese de ingresos (u.m. /mes)	Repercusión mediática (min.)
A. Mayor importancia a críticos.	300	1000	798	401	88
B. Mayor importancia a tiempo reclamación.	25	1225	912	62	907
C. Reclamados por categoría.	50	1300	1410	105	125
D. Capa servidora por	40	796	1370	180	566

criticidad.					
E. Capa servidora por reclamaciones.	40	796	1503	130	500
Vector de Pesos	0,14	0,16	0,08	0,25	0,37
"Más es mejor"	-1	-1	-1	-1	-1

Matriz de dominancia agregada

Se han realizado diferentes simulaciones con diferentes valores de umbrales de concordancia y de discordancia para comprobar la sensibilidad de la solución adoptada ante la variación de dichos umbrales (tal y como se describe en 3.2.5). Para ello se ha utilizado el *software* de MATHCAD.

Usando los valores medios de los elementos de las matrices de índices de concordancia y discordancia, es decir, Umbral_concordancia = **0.5** y Umbral_discordancia = **0.824**, se ha obtenido la siguiente matriz de dominancia agregada:

$$\text{Mda : } \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \blacksquare$$

El grafo correspondiente es:

donde se pone de manifiesto que el núcleo son las alternativas A, C y E.

Con los valores Umbral_concordancia = **0.5** y Umbral_discordancia = **0.78**, se ha obtenido la siguiente matriz:

$$\text{Mda : } \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \blacksquare$$

En este caso el grafo es:

siendo ahora el núcleo A y E.

Con los valores Umbral_concordancia = **0.5** y Umbral_discordancia = **0.95**, se ha obtenido la siguiente matriz:

$$\text{Mda : } \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \blacksquare$$

En este caso el grafo es

siendo ahora el núcleo A y C.

Con los valores Umbral_concordancia = 0.55 y Umbral_discordancia = 0.82, se ha obtenido la siguiente matriz:

$$\text{Mda : } \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Para estos valores el grafo resultante es:

siendo ahora el núcleo A, C y E.

En resumen, se ha realizado un análisis de sensibilidad ante diferentes valores de los valores de umbrales de concordancia y discordancia, empezando por los valores medios. A partir de ahí se ha calculado el resultado aumentando y disminuyendo ambos umbrales, hasta utilizar cuatro combinaciones. Finalmente se concluye en este caso que la alternativa A (“mayor importancia a los críticos”) es la que prevalece como mejor alternativa de manera más o menos independiente de los umbrales de concordancia y discordancia elegidos.

5.4.6. Mediciones

En este apartado se mide el comportamiento en términos de tiempo de computación, en función de la cantidad de entidades a ordenar. El banco de pruebas usado tiene las mismas características para todos los métodos y son las siguientes:

- Cantidad de conjuntos de circuitos cortados: 82
- Cantidad de entidades cortadas que hay en cada conjunto:
 - Máxima: 840
 - Mínima: 40
 - Distribución: valores de cantidades, entre el máximo y el mínimo, con 20 unidades de diferencia de un valor al siguiente. Es decir, 41 valores distintos entre 40 y 840. Para cada valor x de cantidad de entidades, se han elegido dos conjuntos diferentes de entidades, con la misma cantidad x , tomando como medida el valor medio resultante de la métrica que corresponda. Es decir, dos conjuntos de 40 entidades, dos conjuntos de 60, dos conjuntos de 80, etc. En total forman los 82 conjuntos mencionados. Y si lo que

se está midiendo, por ejemplo, es el tiempo de ejecución de 40 entidades, se toma el valor medio del tiempo de ejecución de los dos conjuntos de 40 entidades.

Mostremos en primer lugar el tiempo que se tarda en calcular el listado ordenado de entidades según cada una de las cinco alternativas que se manejan en el planteamiento. Es decir, dado un listado de entidades, se les aplican una a una las alternativas de ordenación para obtener cinco listados de entidades ordenadas, y se mide el tiempo total. Se empieza con 40 entidades y se barre hasta 840.

Figura 41: Tiempo (seg.) de obtención de las 5 alternativas (5 listas). ELECTRE

Claramente se ve que el tiempo aumenta linealmente hasta llegar hacia las 600 entidades, momento en el que la pendiente de aumento del tiempo empieza a aumentar más bruscamente.

La siguiente tarea en el algoritmo es aplicar las funciones de utilidad y calcular el valor de todos los criterios para todas las alternativas. Recordemos que el número de criterios es 5.

Figura 42: Tiempo (seg.) de cálculo de los criterios para la 5 alternativas. ELECTRE

Conforme aumenta la cantidad de entidades aumenta la cantidad de atributos que hay que tener en cuenta, y por tanto aumenta la carga computacional para obtener el valor de todos los criterios de todas las alternativas.

Figura 43: Tiempo total de ejecución (seg.) ELECTRE.

El tiempo total de computación del algoritmo es la suma de los tiempos de las dos tareas anteriores más el tiempo de ejecución del método ELECTRE en sí. Este tiempo es el menor de todos ya que sólo tiene que operar con la matriz decisional (25 atributos) y realizar toda la operativa del método. Además se ha incluido en este tiempo un análisis de sensibilidad con 4 combinaciones de umbrales de concordancia y discordancia, es decir, el método se ejecuta 4 veces con dichas combinaciones y se escoge la solución más estable.

5.4.7. Conclusiones particulares ELECTRE

Las conclusiones más importantes de este apartado han sido las siguientes:

- La principal ventaja que posee es que su planteamiento es muy fácil de entender por los decisores.
- Además el tiempo de cálculo total es rápido, una vez que se han realizado los cálculos previos de las magnitudes de los criterios
- Las tareas computacionalmente más costosas son el cálculo de las listas ordenadas, según las alternativas de ordenación, y el cálculo de los valores de los criterios de cada alternativa, aplicando las funciones de utilidad a todos los atributos que entran en juego.
- Sobre todo el cálculo de las listas ordenadas (alternativas) supera en tiempo de cálculo al cálculo de los criterios, y es más sensible con el aumento de entidades.
- La principal limitación es que se parte de la imposición de un número limitado de alternativas de ordenación, predefinidas y fijas, siendo una tarea del diseñador su definición. Por tanto la solución siempre estará restringida a una de esas alternativas.

5.5. Aplicación de método Multicriterio AHP

El método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) también es un método Multicriterio Discreto, igual que el ELECTRE.

En este método, un problema se estructura en la siguiente clasificación de niveles:

- Nivel 1: Propósito. En nuestro caso sería el propósito del problema que queremos resolver, es decir, la lista priorizada de entidades de transporte afectadas por un corte.
- Nivel 2: Criterios. Son los criterios en los que se basa la decisión. Es decir, representan el mismo concepto que los criterios presentados en el apartado del ELECTRE I.
- Nivel 3: Alternativas. Son las posibles alternativas de solución al problema.

El primer paso del método es establecer los pesos relativos de los criterios. Para ello el método propone empezar por una comparación, por parejas, de los criterios. Esta comparación la debe establecer el decisor, basándose en su experiencia, y en principio es algo sencillo de realizar. Lo que en definitiva se persigue es disminuir la complejidad del problema, abordándolo por partes, para que el decisor pueda aplicar su conocimiento a esas partes por separado.

Por cada pareja de criterios, se establece el número de veces que un criterio es más importante que otro, obteniendo de esta manera una matriz con los valores decididos. Normalmente esos valores responden a la escala de Saaty, que va del 1 al 9 (el valor 1 indica que dos criterios son igual de importantes, y el valor 9 indica que un criterio es extremadamente más importante que el otro). Y la reciprocidad se expresa con los inversos de estos valores.

Así para nuestros cinco criterios presentados en el capítulo, podríamos diseñar (bajo la opinión del decisor) la siguiente matriz de comparación de criterios:

	Coste material	Coste humano	Penalizaciones	Cese de ingresos	Repercusión mediática
Coste material	1	1/2	5	1/5	1/8
Coste humano	2	1	5	1/5	1/8
Penalizaciones	1/5	1/5	1	1/8	1/9
Cese de ingresos	5	5	8	1	1/5
Repercusión mediática	8	8	9	5	1

Mediante la utilización del *software* libre PriEst (con un funcionamiento equivalente al famoso Expert Choice), se obtienen los pesos relativos de los diferentes criterios.

Figura 44: Cálculo de pesos de AHP en PriEst

En formato de tabla:

	Coste material	Coste humano	Penalizaciones	Cese de ingresos	Repercusión mediática
Pesos	0,15	0,17	0,11	0,23	0,34
MinMax	Minimizar	Minimizar	Minimizar	Minimizar	Minimizar

La cual representa aproximadamente la misma relación de pesos de los criterios, que se asignó en la aplicación del método Electre I.

El *software* de PriEst también nos ofrece interesante información gráfica:

Figura 45: Representación en forma de grafo de los pesos de AHP en PriEst

En cuanto a las alternativas a utilizar, para poder realizar una comparación fiel con el otro algoritmo multicriterio discreto que hemos usado en este trabajo (ELECTRE I), en esta utilización del algoritmo AHP utilizaremos la misma definición de Alternativas que hicimos en aquel caso. Es decir, el algoritmo proporcionará como resultado una de estas cinco alternativas:

- A. Mayor importancia a los críticos.
- B. Mayor importancia al tiempo de reclamación.
- C. Reclamados por categoría.
- D. Acción sobre capa servidora por criticidad.
- E. Acción sobre capa servidora por reclamaciones.

La estrategia de aplicación del método es la misma que la del Electre I: se aplican las cinco alternativas al conjunto de entidades cortadas, se realizan los cálculos que impone el algoritmo, se obtiene la mejor alternativa, y se sigue el orden de restauración dictado por dicha alternativa.

La aplicación completa del resto del algoritmo proporciona los resultados finales. De forma resumida los pasos que se aplican son:

- Por cada criterio se evalúan las magnitudes de cada alternativa, según las fórmulas de cálculo impuestas por el criterio.
- Se normalizan los valores obtenidos obteniendo una matriz de pesos de alternativas x criterios.
- Se aplican los pesos y se obtienen los valores normalizados de cada alternativa, con lo que se obtiene la ganadora.

Mediante el *software* PriEst podemos acceder a diferentes gráficos, por ejemplo por cada criterio por separado podemos ver cómo queda evaluada cada alternativa, en función del peso del criterio:

Figura 46: Evaluación de las alternativa para criterio “Coste Material” con PriEst

5.5.1. Mediciones

Para realizar las mediciones de rendimiento se aplica el mismo banco de pruebas que para todos los métodos:

- Cantidad de conjuntos de circuitos cortados: 82
- Distribución de la muestra de entidades: desde 40 a 840 entidades, usando dos conjuntos de datos de cada cantidad.

Al igual que en el método ELECTRE, aquí las tareas previas con las mismas. Es necesario realizar el cálculo del resultado de ordenación de las alternativas y cálculo de valores de criterios para cada alternativa. Lo único que varía es el tiempo de ejecución del método AHP, que es algo menor que el del ELECTRE al incluir menos variaciones de umbrales.

El resultado de las mediciones es el siguiente:

Figura 47: Tiempo total de ejecución (seg.). AHP.

5.5.2. Conclusiones particulares AHP

Las conclusiones más importantes de este apartado han sido las siguientes:

- Igual que ELECTRE I, la principal ventaja que tenemos es que el planteamiento de la utilización de AHP es muy fácil de entender por los decisores.
- Las tareas computacionalmente más costosas son el cálculo de las listas ordenadas, según las alternativas de ordenación, y el cálculo de los valores de los criterios de cada alternativa, aplicando las funciones de utilidad a todos los atributos que entran en juego. Ante eso, el tiempo propio de ejecución del método AHP es ínfimo.
- El tiempo de cálculo de las dos tareas mencionadas es el mismo que la aplicación de ELECTRE I, ya que en ambos métodos se parte de las mismas tareas previas (cálculo del resultado de ordenación de las alternativas y cálculo de valores de criterios para cada una).
- Los resultados son muy parecidos a los obtenidos con ELECTRE I.
- Adolece de la misma limitación que el ELECTRE I, y es que se parte de la imposición de un número limitado de alternativas de ordenación, predefinidas y fijas. Por tanto la solución siempre estará restringida a una de esas alternativas.

5.6. Aplicación de métodos basados en Redes Neuronales

El modelado del problema usando redes neuronales es diferente al planteado en los apartados anteriores.

En principio hemos acotado el uso de redes neuronales a aquellas con **entrenamiento supervisado**. Es decir, aquellas en que los datos para el entrenamiento están constituidos por varios pares de patrones de entrenamiento de entrada y de salida. El hecho de conocer la salida implica que el entrenamiento se beneficia la supervisión del personal experto en la resolución del problema

planteado. Para cada patrón de entrenamiento, los pesos internos de la red serán adaptados en función del par de entrada introducida y salida esperada.

En primer lugar, al definir la red neuronal, hay que decidir cuál será el número de nodos de entrada y el número de nodos de salida. Esta cantidad puede ser variada durante el periodo de entrenamiento, dependiendo de los resultados que se obtengan, pero una vez fijada esa cantidad, esa será la que se use cuando el sistema se ponga en producción. Puesto que la cantidad de caminos/circuitos en fallo, en un momento dado, es variable, aquí aparecen dos posibles planteamientos del problema:

- A. Cada nodo de salida representa una “solución completa de ordenación”. Es decir, por ejemplo, cada nodo de salida representaría a una de las “alternativas” utilizadas en el planteamiento de los apartados anteriores, relativos al método ELECTRE I y AHP. Esto nos simplificaría la salida de la red, ya que sólo estaría compuesta por 5 nodos de salida.
- B. Cada nodo de salida representa directamente el número de orden de cada uno de los caminos/circuitos cortados, que constituyen la entrada de la red.

En cuanto a los nodos de entrada se nos presenta el mismo problema. Tenemos que considerar que cada circuito/camino cortado posee cerca de una docena de parámetros que van a influir en el problema de decisión. Por tanto cada uno de esos parámetros de cada uno de los caminos/circuitos debería ser un dato de entrada para la red.

No tanto por la capa de salida, sino por la capa de entrada de la red, claramente debemos hacer una simplificación del planteamiento para conseguir que exista un número limitado de nodos de entrada a la red.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que hay que realizar un escalamiento y normalización de los valores de entrada. El objetivo es asegurar que todas las variables reciben igual atención en el proceso de entrenamiento y son escaladas de acuerdo a los límites de las funciones de activación utilizadas en las neuronas de la capa de salida de la red.

5.6.1. Opción A: Las salidas son alternativas de ordenación

Siguiendo esta opción, al igual que cuando se expuso la aplicación del método Electre I, lo que hay que hacer es definir el conjunto de alternativas de ordenación, que serán las posibles salidas de la red neuronal. De partida, estas alternativas podrían ser las mismas que las que se utilizaron en aquel momento, es decir:

- A. Mayor importancia a los críticos.
- B. Mayor importancia al tiempo de reclamación.
- C. Reclamados por categoría.
- D. Acción sobre capa servidora por criticidad.
- E. Acción sobre capa servidora por reclamaciones.

Podríamos pensar incluso en utilizar más alternativas, pues en este caso no estamos tan limitados con el número, como lo estábamos con los métodos multicriterio discretos. Mantenemos las mismas para poder hacer comparativas con los otros métodos.

El elemento clave en esta opción de aplicación de red neuronal es el proceso de entrenamiento. Puesto que el entrenamiento lo llevan a cabo personas (los encargados expertos que trabajan en el departamento de mantenimiento), es prácticamente imposible que ante un listado de caminos/circuitos afectados por un corte de red, sean capaces de elegir qué alternativa de ordenación es la más adecuada en cada caso (un humano no puede saber a simple vista si una alternativa es mejor en un cierto patrón de entrada).

Figura 48: Entrenamiento de la Red en la Opción A

Es decir, lo único que pueden hacer los decisores, lo más sencillo para ellos, es realizar una ordenación de los circuitos como si fuera el trabajo manual que ellos realizan diariamente. Y a partir de cada listado obtenido se debe implementar un algoritmo que aproxime ese resultado al obtenido con alguna de las alternativas de ordenación identificadas.

Paso a paso, el método de entrenamiento sería el siguiente:

- Se parte de un conjunto de caminos/circuitos de entrada, recopilando los atributos de cada circuito (en principio 11 atributos por entidad, aunque podrían añadirse más para tener más detalle):
 - Categoría del Cliente

- Calidad de Servicio contratada
- Velocidad
- Precio
- Tipo de Trazado
- Servicios críticos.
- Incomunicaciones de otros servicios (tres atributos de cantidad: Telefonía, Internet, TV)
- Existencia de reclamaciones
- Relaciones de contención entre caminos y circuitos. Con un sólo atributo, la entidad contenida guarda el nombre (identificador) de su entidad contenedora. En caso de no tener entidad contenedora, este atributo estará vacío
- El grupo de expertos decisores realiza la ordenación de los mismos, basándose en los valores de los atributos de cada circuito, y evidentemente, en su propia experiencia.
- Dicha ordenación debe ser comparada con todas la ordenaciones posibles que se obtienen al aplicar cada una de las alternativas. Es decir, suponiendo que existen las 5 alternativas identificadas al principio:
 - Debemos obtener 5 listados de circuitos ordenados, correspondientes a las alternativas A, B, C, D y E.
 - Se debe comparar la ordenación resultante de cada alternativa con la ordenación resultante del grupo de expertos decisores. Esa comparación se basa en un algoritmo de “distancia” tal que será capaz de identificar cuál de las 5 alternativas genera una ordenación más “próxima” a la generada por el grupo de expertos. De forma resumida, este algoritmo de distancia se basa en la diferencia de las posiciones que tiene cada uno de los circuitos, en ambas listas (en la generada por los expertos y en la generada por la alternativa).
 - El algoritmo analiza cada circuito, y para cada uno penaliza la cantidad de posiciones de diferencia, entre la posición que ocupa en la lista de las alternativas con respecto a la posición que ocupa en lista de los decisores.
 - Y por otro lado, para cada circuito, cuenta de manera positiva el hecho de que un circuito, de lista de las alternativas, mantenga la misma ordenación relativa con un conjunto de circuitos de la lista de los decisores. Por ejemplo un circuito X, puede no estar exactamente en la misma posición en ambas listas, pero puede que en ambas listas esté ordenado delante de los circuitos Y y Z.
 - Contabilizando penalizaciones y bonificaciones de cada uno de los circuitos de la lista se obtendrá la medida global de “distancia” entre ambas listas.
- El último paso es elegir la alternativa más “próxima” a la ordenación realizada por los decisores.

El patrón de entrenamiento estará formado, entonces, de la lista de circuitos de entrada (con todos sus atributos) y la alternativa elegida (A, B, C, D ó E). Ese patrón se debe introducir como dato de entrada y salida en la red neuronal, para que la red aprenda, y vaya modificando sus pesos internos.

Como en cualquier entrenamiento, debe seguirse este mismo procedimiento con una gran cantidad de patrones de entrenamiento. Cuánto mayor número de patrones se utilicen, mejor será el aprendizaje de la red.

La cantidad de nodos de entrada N de la red, se habrá también fijado durante la etapa de entrenamiento, por sucesivas aproximaciones. El punto de partida es que debe ser un número bastante grande, del orden de centenas, puesto que en un corte de la red se suelen afectar gran cantidad de circuitos, cada circuito tiene cerca de una docena de atributos, y cada uno de los atributos de cada circuito será un dato de entrada en cada nodo de la red.

Una vez entrenada la red neuronal, llega el momento de la utilización de la misma para las situaciones reales de cortes en la red. El mayor inconveniente aquí, es que la cantidad de nodos de entrada N de la red es fija, mientras que la cantidad de circuitos/caminos afectados por un corte es variable. Si en un corte, la cantidad de circuitos excede la capacidad de los nodos de entrada de la red debemos seguir una estrategia de división de esa cantidad.

Asumamos que N es la cantidad fija de nodos de entrada que tendría la red. Si ahora, en un momento dado se produce un corte en la red, y el corte afecta a una cantidad de circuitos/caminos M , cumpliéndose:

$$M(\text{entidades}) * \text{Cantidad_Parámetros_por_Entidad} < N,$$

no habrá ningún problema, ya que la red tendrá capacidad suficiente, para producir un resultado en una única ejecución.

En cambio, si la anterior ecuación supera el valor de N (situación, por cierto, que será más habitual que la anterior), dado que la capacidad de la red neuronal está limitada a ese valor de N , no podremos introducir todos los datos de todos los circuitos a la vez en la red neuronal. Esto implica que el orden obtenido como salida de la red neuronal no será un orden completo. Será un orden que sólo abarcará a los caminos/circuitos cuyos datos se hayan introducido en la red, pero dejará fuera el resto de caminos/circuitos producidos en el mismo corte de red.

Ante esta situación, y de una forma genérica, a partir de los M circuitos/caminos afectados en un corte de red, sería necesario subdividir aleatoriamente ese conjunto en una serie de conjuntos M_i , tal que cada uno de ellos pudiera ser usado de forma completa como entrada de la red (es decir, la cantidad de entidades que contendrá cada uno de esos conjuntos será igual a $N/\text{Cantidad de parámetros por Entidad}$). Supongamos que tenemos una cantidad K de conjuntos M_i .

Figura 49: Procedimiento de aplicación de la Opción A

De esta manera obtendríamos una serie de K diferentes alternativas A_i de ordenación de circuitos, y la aplicación de cada alternativa genera una lista MO_i de circuitos ordenados.

El problema es que entre esos conjuntos no existiría ninguna relación de prioridad. ¿Qué podemos hacer entonces?. Aunque no es una solución óptima lo que podemos hacer es escoger los P circuitos/caminos más “prioritarios” de cada uno de los conjuntos MO_i y reinyectarlos todos juntos de nuevo dentro de la red neuronal. El valor de P debe ser tal que los N nodos de entrada de la red tengan capacidad suficiente para aceptar de una sola vez los P circuitos de la unión de todos los conjuntos MO_i . Es decir:

$$\sum P_i * \text{Cantidad de Parámetros por Entidad} < N$$

En cualquier caso, en un única ejecución de este procedimiento, la salida final sólo proporciona un subconjunto de caminos/circuitos ordenados, no son todos. Para conseguir una ordenación completa hay que volver a reinyectar en la red neuronal, en sucesivas iteraciones, el resto de $M-P$ circuitos de cada grupo MO_i , y continuar así hasta finalizar de procesarlos todos. La ventaja es que en paralelo a la ejecución de estas siguientes iteraciones, ya se puede lanzar al equipo técnico a la reparación de la primera lista de circuitos ordenados. Por tanto el posible aumento de tiempo de ejecución total del algoritmo se ve compensado con el hecho de poseer una primer resultado parcial, pero suficiente para poner a trabajar al equipo técnico responsable de las reparaciones.

5.6.2. Opción B: La salida es el orden de cada circuito

En este caso cada nodo de salida de la red ofrece un valor entero que representa el número de orden de cada uno de los circuitos de entrada, en la ordenación final que deben tener según su prioridad de reparación.

La ventaja principal de esta opción es que la fase de entrenamiento es muy intuitiva. Es decir a partir de un listado determinado de caminos y circuitos, la salida de la red está constituida por la misma lista de caminos y circuitos, pero ordenados según las prioridades del decisor (o decisores), que en este caso será una persona experta que trabaje en el departamento de mantenimiento de la operadora.

La única restricción que tiene este entrenamiento es que la cantidad máxima de caminos/circuitos con los que se puede alimentar la red neuronal tiene un tope máximo determinado por la cantidad de nodos de la red. Podemos aumentar o disminuir la cantidad de nodos, pero en un momento dado hay que fijar su número. Así pues, si N es la cantidad de nodos de la red, y M es la cantidad de entidades que tiene cada conjunto de entrenamiento, siempre se deberán elegir los valores de M y N tal que se cumpla la ecuación:

$$M(\text{entidades}) * \text{Cantidad_Parámetros_por_Entidad} < N$$

Dicho de otro modo, si M es la cantidad de caminos/circuitos que alimentan la red, M por tanto será la cantidad de nodos de salida de la red; y si C es la cantidad de parámetros por Entidad, entonces la cantidad de nodos de entrada N será:

$$N = M * C$$

En la entrada de la red, los primeros C nodos de la red procesarán los parámetros de entrada del primer circuito; los segundos C nodos (del $C+1$ al $2C$) procesarán los parámetros de entrada del segundo circuito; y así sucesivamente hasta completar con valores los N nodos de entrada de la red.

En la salida de la red, el primer nodo de salida deberá proporcionar el número de orden que corresponde al primer circuito (según la prioridad establecida por la inteligencia de la red); el segundo nodo de salida proporcionará el número de orden que corresponde al segundo circuito ; y así sucesivamente hasta completar los M nodos de salida.

Figura 50: Entrenamiento de la Red en la Opción B

De forma detallada, los valores de los nodos de entrada y salida serían:

- Nodos de Entrada (N nodos):
 - Nodo 1: Parámetro 1 del circuito 1
 - Nodo 2: Parámetro 2 del circuito 1
 - ...
 - Nodo C: Parámetro C del circuito 1
 - Nodo C+1: Parámetro 1 del circuito 2
 - Nodo C+2: Parámetro 2 del circuito 2
 - ...
 - Nodo 2C+1: Parámetro 1 del circuito 3
 - ...
 - Nodo N: Parámetro C del circuito M
- Nodos de Salida (M nodos):
 - Nodo 1: Número de orden del circuito 1. Ejemplo de valor: 17.
 - Nodo 2: Número de orden del circuito 2. Ejemplo de valor: 4.

- ...
- Nodo M: Número de orden del circuito M: Ejemplo de valor: 6.

Si seguimos la misma estrategia de aplicación que la descrita en el apartado de Electre I, de aplicar el algoritmo cada vez que se produzca un corte en la red, ahora debemos prestar especial atención a la cantidad de caminos/circuitos que van a ser ordenados en cada ejecución, ya que eso impacta de forma directa en la dimensión de la red neuronal.

Con esta definición se presenta la misma casuística que la definida en la Opción A, es decir, no podremos introducir todos los datos de todos los circuitos a la vez en la red neuronal si M es demasiado grande (lo habitual). Ante esta situación, a partir de los M circuitos/caminos afectados en un corte de red, sería necesario subdividir aleatoriamente ese conjunto en una serie de conjuntos M_i , tal que cada uno de ellos pudiera ser usado de forma completa como entrada de la red (es decir, la cantidad de entidades que contendrá cada uno de esos conjuntos será igual a N/C).

De esta manera obtendríamos una serie de conjuntos MO_i de circuitos ordenados. A continuación lo que hay que hacer es escoger los P circuitos/caminos más “prioritarios” de cada uno de los conjuntos MO_i y reinyectarlos todos juntos de nuevo dentro de la red neuronal. El valor de P debe ser tal que los N nodos de entrada de la red tengan capacidad suficiente para aceptar de una sola vez los P circuitos de la unión de todos los conjuntos MO_i . Es decir: $\sum P_i * C < N$.

Figura 51: Procedimiento de aplicación de la Opción B

Igual que en la opción A, en una única ejecución de este procedimiento, la salida final sólo proporciona un subconjunto de caminos/circuitos ordenados, no son todos. Para conseguir una ordenación completa hay que volver a reinyectar en la red neuronal, en sucesivas iteraciones, el resto de $M-P$ circuitos de cada grupo MO_i , y continuar así hasta finalizar de procesarlos todos. La

ventaja es que en paralelo a la ejecución de estas siguientes iteraciones, ya se puede lanzar al equipo técnico a la reparación de la primera lista de circuitos ordenados.

5.6.3. Entrenamiento y simulaciones

Se han realizado simulaciones utilizando librerías de *software* de MATLAB de MathWorks. Concretamente la *Neural Network Toolbox* que permite una amplia variedad de arquitecturas y funciones de entrenamiento. Las aplicaciones disponibles en *Neural Network Toolbox* permiten diseñar, entrenar, visualizar y simular interactivamente la red para posteriormente generar el código MATLAB equivalente y así poder automatizar el proceso.

Figura 52: Inicio del Neural Network Toolbox de MATLAB

Para nuestro problema debemos usar la herramienta *Fitting Tool* (nftool).

Figura 53: Fitting Tool de MATLAB

Para el entrenamiento de las redes se deben utilizar parejas de entradas y salidas. Cada entrada o salida se representa como un vector de valores en MATLAB. Al final lo que obtenemos es una matriz de entradas y otra de salidas, que hay que inyectar en la red.

Figura 54: Selección de datos para entrenamiento en la Fitting Tool de MATLAB

Para los entrenamientos se han utilizado 40 parejas de entradas y salidas para cada una de las opciones entrenadas. De esas 40 parejas, MATLAB nos permite elegir el porcentaje que se destina a entrenamiento y el que se destina a validación del mismo:

Figura 55: Selección de datos para entrenamiento y para validación de una red neuronal

Una vez cargados los datos, el software de MATLAB realiza el entrenamiento y ofrece resultados sobre el rendimiento del mismo.

Figura 56: Estadísticas sobre el entrenamiento de una red neuronal

Con la red entrenada, basta con introducir los datos de entrada de cada simulación para ir obteniendo los datos de salida de la red.

5.6.4. Influencia del número de redes y sus nodos

Se analiza en este apartado la variabilidad y funcionamiento del algoritmo con redes neuronales, variando la cantidad de nodos N , comparando la opción A con la opción B, y utilizando un banco de pruebas en el que varía la cantidad de entidades cortadas.

Las mediciones obtenidas son los tiempos de ejecución completos, hasta que se obtiene como resultado la lista de entidades ordenada, medidos en segundos.

Para las mediciones de la sensibilidad de los dos modelos de redes neuronales presentados, respecto a la cantidad de entidades presentes en cada incidencia o corte de red, el banco de pruebas usado tiene las siguientes características:

- Cantidad de conjuntos de circuitos cortados: 82
- Cantidad de entidades cortadas que hay en cada conjunto:
 - Máxima: 840
 - Mínima: 40
 - Distribución: valores de cantidades, entre el máximo y el mínimo, con 20 unidades de diferencia de un valor al siguiente. Es decir, 41 valores distintos entre 40 y 840. Para cada valor x de cantidad de entidades, se han elegido dos conjuntos diferentes de entidades, con la misma cantidad x , tomando como medida el valor medio resultante de la métrica que corresponda. Es decir, dos conjuntos de 40 entidades, dos conjuntos de 60, dos conjuntos de 80, etc. En total forman los 82 conjuntos mencionados. Y si lo que se está midiendo, por ejemplo, es el tiempo de ejecución de 40 entidades, se toma el valor medio del tiempo de ejecución de los dos conjuntos de 40 entidades.

Redes con capacidad para 20 circuitos

En primer lugar se realizan las mediciones con una red con pocos nodos de entrada. Solamente los suficientes para poder ser alimentada con 20 caminos/circuitos a la vez. Es decir, la red cumple que:

$$\text{Nodos de la Red (N)} = 20 * \text{Cantidad de parámetros (C)}$$

que es lo mismo que decir que $N/C = 20$.

Donde C es la Cantidad de parámetros por Entidad afectada por un corte. Dado que manejamos un valor de cantidad de parámetros = 11, eso quiere decir que para poder procesar 20 entidades en una sola ejecución de la red, se necesita una red de 220 nodos de entrada.

Con capacidad para 20 circuitos y procesamiento en Serie

La primera comparativa muestra los tiempos de ejecución de una red neuronal diseñada según la opción A (las salidas son alternativas de ordenación), con otra diseñada según la opción B (las salidas son directamente las posiciones ordenadas de los circuitos). En ambos casos la restricción es que la combinación de HW/SW utilizado para las pruebas sólo tiene capacidad para procesar una red neuronal completa cada vez. Es decir, en el caso de que la cantidad de circuitos sea grande y eso

implique ejecutar varias veces el procesado de la red neuronal (con varios subconjuntos de esos circuitos), cada ejecución tendrá lugar tras la finalización de la anterior. Es decir, se presupone un procesamiento “en serie” de las diferentes veces que sea necesario ejecutar el procesado de la red neuronal.

Figura 57: Tiempo ejecución (seg), en función de cantidad de Entidades. En Serie

Vemos que conforme se van aumentando la cantidad de entidades, el aumento del tiempo de ejecución sigue un aumento lineal, tanto en la opción A como en la B.

La diferencia entre las ejecuciones que siguen la opción A (en la que las salidas son alternativas) y las que siguen la opción B (en la que la salida son directamente circuitos ordenados), es que en la primera hay que sumar un tiempo adicional al tiempo total de ejecución, debido precisamente a que la salida de la red es una alternativa de ordenación. Por tanto, es necesario un último paso para ejecutar la fórmula de ordenación que indica esa alternativa seleccionada, sobre los circuitos de entrada a esa red, para conseguir la lista ordenada de circuitos de salida.

Dado que la cantidad de nodos de entrada es pequeña, incluso con el valor más bajo de circuitos de entrada, que son 40, no existe capacidad suficiente en un sólo paso de ejecución de la red neuronal. Ya con 40 circuitos es necesario ejecutar 3 veces la red neuronal (siguiendo bajo la suposición de ejecución en serie):

- La primera ejecución de la red estaría alimentada por los primeros 20 circuitos. El resultado de la salida se almacena para ser usado en la tercera ejecución.
- La segunda estaría alimentada por los circuitos del 21 al 40. Aquí también el resultado de la salida se almacena para ser usado en la tercera ejecución.
- La tercera ejecución sería alimentada por los primeros 10 circuitos de la salida de la primera ejecución, más los primeros 10 circuitos de la salida de la segunda ejecución.

Al pasar de 40 circuitos a 60, de nuevo se necesita un paso de ejecución adicional de la red, para poder procesar los circuitos del 41 al 60. Y esto vuelve a ocurrir cada 20 circuitos que se añaden al problema. De ahí la linealidad observada en la gráfica.

Se llega a un primer límite significativo en los 400 circuitos, en los que se necesitan justamente 20 ejecuciones de la red (tomando cada una 20 circuitos como entrada), pero de su salida sólo se puede tomar un circuito de cada una, justamente para inyectarlo como entrada en la última ejecución. O sea se necesitan para este caso 21 pasos de ejecución de la red.

A partir de ese límite, con 420 circuitos, no se necesitan 22 sino 23 pasos de ejecución. En lugar de realizar dos “pasadas” hay que hacer tres:

- La primera pasada barre 400 circuitos con 20 pasos de ejecución. Y se necesita un paso adicional para barrer los circuitos del 401 al 420.
- La segunda pasada toma los resultados de las ejecuciones de los primeros 400 circuitos y da una salida.
- La tercera pasada toma los resultados de la segunda, más el resultado de la ejecución de los 401 al 420.

Cuando se llega a los 800 circuitos se vuelve a saturar este modelo y hará falta una cuarta pasada, por lo que se nota otro salto en la gráfica al necesitarse una ejecución adicional.

Redes con capacidad para 100 circuitos

En segundo lugar se realizan las mediciones con una red de mayor dimensión, con suficientes nodos de entrada para poder ser alimentada con 100 caminos/circuitos a la vez. Es decir, la red cumple que:

$$\text{Nodos de la Red (N)} = 100 * \text{Cantidad de parámetros (C)}$$

Donde C es la Cantidad de parámetros por Entidad afectada por un corte. Dado que manejamos un valor de cantidad de parámetros = 11, eso quiere decir que para poder procesar 100 entidades en una sola ejecución de la red, se necesita una red de 1100 nodos de entrada.

Una red con mayor cantidad de nodos tiene en principio la ventaja de procesar mayor cantidad de información en paralelo. Sin embargo esto debe ser corroborado de manera experimental con las mediciones, puesto que también supone una mayor carga computacional para el hardware y software que soporte la ejecución.

Con capacidad para 100 circuitos y procesamiento en Serie

Al igual que se hizo con la cantidad de nodos anterior ($N/C=20$), la primera comparativa muestra los tiempos de ejecución presuponiendo un procesamiento “en serie” de las diferentes veces que sea necesario ejecutar el procesado de la red neuronal.

Figura 58: Tiempo ejecución (seg), en función de cantidad de Entidades. A y B. En Serie

De la visualización de esta gráfica se puede ver claramente el comportamiento esperado cuando la cantidad de circuitos es pequeña. Hasta un valor de 100 circuitos, la cantidad N de nodos de entrada de la red tiene capacidad suficiente para procesar, en un único paso de ejecución, todos los caminos / circuitos de entrada. Sin llegar a ese límite de 100, se puede notar un ligero aumento del tiempo de ejecución en función de la cantidad de circuitos, pero prácticamente insignificante, ya que la red prácticamente tarda lo mismo en proporcionar el resultado en sus nodos de salida independientemente de la cantidad de entradas no nulas que reciba.

Por la forma de afrontar el problema, descrita en apartados anteriores, nada más superar los 100 circuitos sería necesario ejecutar al menos 3 veces la red neuronal (siguiendo bajo la suposición de ejecución en serie):

- La primera ejecución de la red estaría alimentada por los primeros 100 circuitos. El resultado de la salida se almacena para ser usado en la tercera ejecución.
- La segunda estaría alimentada por los circuitos del 101 al 200. Aquí también el resultado de la salida se almacena para ser usado en la tercera ejecución.
- La tercera ejecución sería alimentada por los primeros 50 circuitos de la salida de la primera ejecución, más los primeros 50 circuitos de la salida de la segunda ejecución.

Debido a este salto, de una a tres ejecuciones, se puede ver una discontinuidad en la gráfica, precisamente a partir de 100 circuitos.

Además, las ejecuciones que siguen la opción A (en la que las salidas son alternativas), hay que sumar un tiempo adicional al tiempo total de ejecución, debido precisamente a que la salida de la red es una alternativa de ordenación, y no directamente un listado de circuitos. Por tanto, a continuación es necesario ejecutar la fórmula de ordenación que indica esa alternativa seleccionada, sobre todos los circuitos de entrada, para conseguir la lista ordenada definitiva de circuitos de salida.

Se puede comprobar en la gráfica, que el tiempo adicional que se suma, debido a esta necesidad de ordenación posterior en la opción A, es siempre superior al tiempo que tarda en ofrecer su resultado

la red neuronal de la opción B (en la que la salida son directamente circuitos ordenados). Esto a pesar de que la red neuronal de la opción B tiene mayor carga computacional que la de la opción A, dado que la cantidad de nodos de salida es mucho mayor que en la de la opción B.

Es decir, para conseguir el resultado final de obtener una lista de circuitos ordenados, la opción B, en su conjunto, es mejor en tiempo de ejecución que la opción A. Evidentemente no son todas ventajas para la opción B, puesto que su tiempo de entrenamiento y cantidad de patrones que necesita para entrenarse bien, es mucho mayor. O dicho de otro modo, con el mismo conjunto de patrones de entrenamiento, y mismo tiempo de entrenamiento, los resultados de la red probablemente no estén igual de optimizados en la opción A y B. Sin embargo para confirmar esto es necesario remitirnos a los apartados siguientes en los que se analizarán los resultados finales que proporcionan estos dos y el resto de métodos de priorización.

El último efecto que podemos ver en la gráfica es que justo al superar 200 circuitos el incremento de tiempo es menor que el producido cuando nada más se superaron los 100. Esto es debido a que no se producen las mismas ejecuciones de la red neuronal. Nada más superar los 100 ya se necesitan tres ejecuciones de la red, tal y como se describió más arriba. Es decir, se pasa de necesitar una a necesitar tres ejecuciones. Sin embargo, nada más superar las 200, se necesitan cuatro ejecuciones:

- La primera ejecución de la red estaría alimentada por los primeros 100 circuitos. El resultado de la salida se almacena para ser usado en la última ejecución.
- La segunda estaría alimentada por los circuitos del 101 al 200. Aquí también el resultado de la salida se almacena para ser usado en la última ejecución.
- La tercera estaría alimentada por los circuitos del 201 al 300. Aquí también el resultado de la salida se almacena para ser usado en la última ejecución.
- La cuarta y última ejecución sería alimentada por los primeros 33 circuitos de la salida de la primera ejecución, más los primeros 33 circuitos de la salida de la segunda ejecución, más los primeros 33 circuitos de la salida de la tercera.

Y lo mismo ocurre al superar las 300, 400, etc. Es decir hay un salto de dos ejecuciones al superar los 100 circuitos, y posteriormente sólo hay un salto de una ejecución adicional por cada bloque de 100 circuitos más.

Por tanto, de todo esto podemos concluir, sobre el tiempo de ejecución, que:

- Hay escaso ahorro de tiempo cuando no se utilizan todos los nodos de entrada de una red.
- Cada vez que el número de circuitos supera una determinada centena, hay que sumar el tiempo de ejecución de una red adicional (debido al procesamiento en serie). Salvo la primera centena en la que hay que sumar dos ejecuciones

Comparemos el comportamiento de cada una de las opciones A y B, mirando los tiempos alcanzados con las redes con capacidad para 20 circuitos y las que tienen capacidad para 100.

Para la opción A (la salida de la red neuronal es una alternativa de ordenación):

Figura 59: Tiempo ejecución (seg), en función de cantidad de Entidades. A. En Serie

Para la opción B (la salida de la red es directamente una ordenación):

Figura 60: Tiempo ejecución (seg), en función de cantidad de Entidades. B. En Serie

A la vista de esta comparativa, como conclusión adicional a las anteriormente citadas tenemos que:

- Es más rápida la opción B completa, que el tiempo de la opción A sumada a la ordenación posterior necesaria, según la alternativa elegida.

Con capacidad para 100 circuitos y procesamiento en Paralelo

A continuación, manteniéndonos en el caso de que cada red neuronal del diseño, cumple que puede ser alimentada con 100 caminos/circuitos a la vez, veamos ahora el comportamiento con una plataforma HW/SW capaz de ejecutar el procesamiento de varias redes neuronales en paralelo.

Para poder lanzar la ejecución en paralelo de varias redes, tienen que cumplir que puedan trabajar de manera independiente, es decir que sus salidas y entradas no estén relacionadas. Dicho de otro modo, que una red no tenga que esperar a que la otra entregue sus resultados. Esto es fácil de cumplirse cuando tenemos una gran cantidad de circuitos cortados, debido al diseño que se ha presentado en los apartados anteriores.

La simulación se ha realizado únicamente para la opción B, opción en que las salidas de las redes directamente circuitos, en un cierto orden. En cualquier caso también sería aplicable a la opción A, y los resultados deberían ser bastante similares, al compartir ambas opciones el mismo esquema de distribución de entradas y salidas entre las diferentes redes neuronales que forman la solución.

Se han realizado tres simulaciones, con una, dos y cuatro redes y a continuación se presentan los resultados obtenidos en el tiempo de ejecución.

Figura 61: Tiempo ejecución (seg), en función de cantidad de Entidades. B. En Paralelo

El análisis de la gráfica demuestra la influencia positiva de la capacidad de procesamiento paralelo de la plataforma con respecto al tiempo de ejecución, como no podría ser de otra manera.

Hasta llegar a la cantidad de 100 entidades cortadas los tres esquemas funcionan exactamente igual, ya que no se llega a superar la capacidad de una única red. En esta situación no se saca ninguna ventaja de tener 2 o más redes en paralelo porque sólo una estará funcionando. En esta situación sólo se aprecia un ligero incremento del tiempo de ejecución al aumentar la cantidad de entidades de entrada.

Entre 100 y 200 entidades ya se pueden alimentar dos redes en paralelo, la primera con 100 entidades y la segunda con el resto hasta 200. Sin embargo es necesaria una tercera ejecución, que además debe esperar a la finalización de las dos primeras, ya que sería alimentada por los primeros 50 circuitos de la salida de la primera ejecución, más los primeros 50 circuitos de la salida de la segunda ejecución. Debido a esto, los esquemas con dos o cuatro redes pueden resolver el problema en dos pasos de ejecución, mientras que el esquema de una red necesita tres pasos de ejecución.

Entre 200 y 400 entidades se pueden alimentar a tres y cuatro redes en paralelo (100 por red). Aquí el esquema con cuatro redes puede absorber toda esta cantidad de entidades en un solo paso de ejecución, mientras que el esquema con dos redes necesitará al menos dos pasos de ejecución para aceptar todas estas entidades. Siempre hay que sumar un paso adicional, de manera lineal, para procesar las salidas obtenidas en los primeros pasos de la ejecución. En caso de tener, por ejemplo, 400 entidades, este último paso de ejecución procesaría las 25 primeras entidades de salida que proporciona cada una de las redes en el primer paso.

Conforme sigue aumentando la cantidad de entidades se aprecia más la mejora, en tiempo de ejecución, de tener mayor cantidad de redes en paralelo.

Evidentemente, el peaje que debemos pagar, usando redes en paralelo, será que tendremos un mayor coste de infraestructura *hardware*.

5.6.5. Conclusiones particulares del método

Principalmente han sido estas:

- El modelado es complicado y el entrenamiento también
- Usando la opción A nos encontramos con la misma limitación que en ELECTRE, y es que se parte de la imposición de un número limitado de alternativas de ordenación, predefinidas y fijas, y se fuerza a que la solución final siempre se encuentre entre una de esas alternativas.
- Usando la opción B por fin escapamos de la limitación de las cinco alternativas. Las soluciones de la opción B no están restringidas a un pequeño conjunto, sino que pueden ser cualquiera.
- Aún no podemos saber si las soluciones arrojadas son o no buenas, hasta que las comparemos con las obtenidas con el resto de métodos.

Sobre el tiempo de ejecución, podemos concluir que:

- Los tiempos de ejecución son algo mayores que en los algoritmos anteriores debido a la necesidad de recursos que tiene el algoritmo.
- Hay escaso ahorro de tiempo cuando no se utilizan todos los nodos de entrada de una red, comparándolo con cuando sí se utilizan. Para las comparativas con otros métodos se ha usado la red de 30 nodos.
- Cada vez que el número de circuitos supera una determinada centena, hay que sumar el tiempo de ejecución de una red adicional (debido al procesamiento en serie). Salvo la primera centena en la que hay que sumar dos ejecuciones
- Es más rápida la opción B completa, que el tiempo de la opción A sumada a la ordenación posterior necesaria, según la alternativa elegida.
- Usando Redes Neuronales, y dada la envergadura del problema, lo más adecuado es realizar una implementación en paralelo para poder aprovechar que el método así lo permite, y conseguir un ahorro total de tiempo de computación. Eso implicará dedicar recursos hardware adicionales, pero merece la pena la inversión.

5.7. Aplicación de método basado en PSO

En este apartado se describe la aplicación de un algoritmo basado en la Optimización por enjambre o nube de partículas (conocido en inglés como PSO) a nuestro problema de priorización de acciones de restauración en la red.

Lo primero que hay que identificar es qué va a quedar representado como una “partícula” en este caso, puesto que las partículas son los elementos principales en un planteamiento de algoritmo PSO. Por analogía con el planteamiento del resto de algoritmos tratados en este trabajo, aquí se nos presentan dos opciones de manera inmediata:

- A. Cada partícula representa una “ordenación completa” (y por tanto priorizada) de todas las entidades a reparar.
- B. Cada partícula representa solamente a una entidad afectada por un corte.

En la opción A cada partícula estaría representada por un vector cuya dimensión sería igual a la cantidad de entidades afectadas por un corte de la red; y cuyas valores de coordenadas serían los identificadores de las entidades dispuestas en el orden en que deben ser reparadas. Así por ejemplo si el listado de entidades afectadas fuera sólo de 4 circuitos identificados como cA, cB, cC y cD, posibles partículas x_i serían:

- $x_1 = (cA, cB, cC, cD)$, que significa que el orden de reparación es empezando por el cA y terminando por el cD.
- $x_2 = (cA, cC, cB, cD)$, que significa que el orden de reparación es cA, cC, cB, cD.
- $x_3 = (cD, cB, cC, cA)$, que significa que el orden de reparación es cD, cB, cC, cA.
- etc.

Siguiendo esta regla, conforme aumenta la cantidad de entidades afectadas a N, si queremos tener representadas como partículas todas y cada una de las posibles ordenaciones, tendríamos un número inmanejable de partículas ($N!$). Igual que hemos hecho en la aplicación de algoritmos anteriores, el no tener representadas todas las posibles ordenaciones por completo sería una aproximación aceptable que no le quita validez al modelado.

Podríamos plantearnos usar una cierta cantidad M de partículas, que representarían la cantidad de ordenaciones posibles que se estarían evaluando en paralelo dentro del algoritmo. Aunque M fuera pequeño, por ejemplo 5, esto podría ser comparable con la aplicación que se ha hecho del Electre I o del AHP, en los cuales sólo se evaluaban 5 alternativas de ordenación.

Suponiendo que cada partícula x_i es una determinada ordenación de entidades, el movimiento de cada partícula dentro del enjambre, en cada iteración del algoritmo PSO, se traduce en una variación de sus coordenadas, es decir, una variación de la ordenación. Siguiendo con el ejemplo anterior, la partícula x_1 cuyo vector de coordenadas es inicialmente (cA, cB, cC, cD), en la siguiente iteración del algoritmo podría pasar a tener las coordenadas (cB, cA, cD, cC). Por tanto, aunque se estén manejando una cantidad finita M de partículas, puesto que cada partícula va variando su posición (va variando sus coordenadas en el espacio del problema, es decir la ordenación de entidades a la que representa) realmente se están explorando una gran cantidad de ordenaciones posibles, mucho mayor que ese valor de M.

En el paso final del algoritmo, cuando finaliza, la solución al problema sería el “Global Best” del PSO, es decir, el conjunto de coordenadas de la mejor posición encontrada hasta el momento por cualquier partícula del conjunto.

Pasemos a estudiar ahora la **opción B**. En esta opción cada partícula representa solamente a una entidad afectada por un corte. El espacio en el que se mueven estas partículas es unidimensional; ni siquiera es un plano, es únicamente una recta. Cada partícula tiene una única coordenada numérica, que representa su posición dentro del orden de restauración de entidades. Podemos realizar un planteamiento abstracto del problema diciendo que se trata de resolver un problema de “permutaciones de enteros”, dado que lo que se quiere es realizar una ordenación de una lista. En este sentido es un problema parecido al famoso problema del agente viajante, explicado en [41][45], el cual debe realizar un recorrido de una serie de ciudades en un cierto orden, de una forma óptima. Existen algunas propuestas de resolución de problemas de este tipo como por ejemplo la realizada por Clerc en [88], aunque la planteada en esta tesis tiene sus particularidades.

Así, en el ejemplo expuesto anteriormente, con un listado de entidades afectadas de sólo de 4 circuitos identificados como cA, cB, cC y cD, sólo habría cuatro posibles partículas x_i que serían:

- x_1 que representaría al circuito cA. Un posible valor inicial de sus coordenadas podría ser igual a “2”, lo cual significa que cA debe ser restaurado en segundo lugar.
- x_2 representaría al circuito cB, y un posible valor inicial podría ser “4”, significando esto que cB debe ser restaurado en cuarto lugar.
- x_3 representaría al circuito cC, y un posible valor inicial podría ser “1”, significando que cC debe ser restaurado en primer lugar.
- x_4 sería la última partícula, que representaría al circuito cD. Su coordenada inicial debería ser “3” (por eliminación con el resto de valores, evidentemente).

Este modelado, en un ejemplo real con una gran cantidad N de entidades a priorizar, hace que debamos tener ese mismo número N de partículas. Pero dado que las coordenadas de cada partícula son solamente un número, el planteamiento no tendrá una complejidad inmanejable.

Como hemos dicho, el espacio de movimiento de las partículas es una recta, la cual tiene N posibles posiciones en las cuales se pueden situar las partículas. Las posiciones son discretas, finitas y determinadas (son los números naturales entre 1 y N).

La inicialización de problema, como en toda aplicación de PSO partirá de unas coordenadas aleatorias para las N partículas (lo cual se traduce en una ordenación aleatoria), y de una “velocidad” inicial (inercia de las partículas).

Las partículas podrán moverse en el espacio únicamente hacia un lado o hacia otro (el espacio es una recta). Como siempre, en cada iteración del algoritmo PSO, las partículas buscarán su mejor posición particular, pero en la posición final que ocupen, al final de la iteración, influirá también la mejor posición global del enjambre.

Figura 62: Aplicación de PSO en espacio unidimensional

Vista de forma aislada, cada partícula, querrá que el circuito al que representa sea restaurado en el menor tiempo posible desde el inicio del corte. Esta es la **“función objetivo”** que pretende maximizar cada partícula. Evidentemente el cálculo del tiempo total de restauración de un circuito se ve influenciado por todos los circuitos que están delante y en los que se ha gastado un tiempo previo en restaurar, antes de llegar al circuito que representa la partícula en cuestión. La función objetivo de una partícula es la que permite comparar su posición actual, con el histórico de posiciones pasadas en las iteraciones previas, y producir como resultado la mejor posición (P_{BEST}) de la partícula.

En la opción B, dada la coordenada de una partícula (en una cierta iteración del algoritmo) es relativamente sencillo calcular el valor de la **función objetivo** de esa partícula aislada, ya que la definiremos como su **tiempo de restauración desde el inicio del corte**. No lo es así en la opción A. En la opción A el cálculo es más complejo, ya que deberíamos recurrir a algún método de teoría de la decisión para comparar si la posición de una partícula en un instante dado (que es una ordenación de circuitos) es mejor que en otro instante (que es otra ordenación), y la comparación de las dos ordenaciones sería como dos alternativas que hay que evaluar teniendo en cuenta todos los criterios que venimos manejando en este capítulo. Y este cálculo hay que repetirlo para todas las partículas del problema, en cada iteración del algoritmo. Esta razón ha sido una de las principales causas de **haber elegido finalmente la opción B para la aplicación de PSO**.

Visto el enjambre de forma global, en cada iteración, una vez que se han movido todas las partículas respecto a la posición anterior, lo que se tendrá es una nueva ordenación de los circuitos. En ese

momento hay que averiguar si esta nueva ordenación global es “mejor” que la última mejor ordenación/posición global (G_{BEST}) del enjambre. ¿Cómo saber si una ordenación es mejor que otra?, pues aquí responderemos recurriendo de nuevo a uno de los métodos multicriterio discretos ya utilizados, por ejemplo ELECTRE I, en el que mantendremos los 5 criterios que se definieron en un principio, pero únicamente tendremos dos alternativas: la ordenación actual, en el actual paso de iteración, y la mejor ordenación global obtenida en cualquier iteración pasada.

La comparación anterior introduce una pequeña variación en lo que es un algoritmo PSO clásico. No hablamos de una única posición global G que es la mejor posición que cualquier partícula puede tener en el enjambre (que claramente siempre sería la posición 1, o sea, ser restaurado en primer lugar), sino que, para cada partícula, existe un mejor posición G_i por influencia del enjambre, determinada por la evaluación global de las posiciones que tienen las partículas en cada paso de la iteración.

Cuando finalicen las iteraciones del PSO, en la mejor ordenación global hasta ese instante tendremos la solución al problema.

Dado que el espacio en el que se mueven las partículas es unidimensional, una conclusión apresurada podría ser que la tendencia de cada partícula individual, para mejorar su posición, será siempre ir hacia adelante en el orden. Esta conclusión podría ser cierta si todas las entidades fueran independientes, ya que en ese caso todas entrarían en la competición por ser las primeras. Pero hay dos razones principales para que esto no se cumpla así:

- En primer lugar el tiempo de restauración no es lineal. Por ejemplo, por el hecho de pasar de la posición 2 a la posición 4 no significa que se duplique el tiempo de restauración del circuito (representado por la partícula). Veámoslo con valores de tiempos para ilustrarlo. Podríamos tener una serie de circuitos ordenados consecutivamente y con el siguiente tiempo de restauración:
 - Circuito 1, $t = 20$ minutos,
 - Circuito 2, $t = 1$ minuto
 - Circuito 3, $t = 15$ segundos,
 - Circuito 4, $t = 45$ segundos,
- En esta situación, el circuito 2 acaba de ser restaurado tras 21 minutos a partir del inicio del corte. Si debido a una reordenación por el movimiento de las partículas, el circuito 2 pasa a ser el último de todos, el momento en el que acabaría de ser restaurado sería tras 22 minutos (20 min. + 15 seg. + 45 seg. + 1 min.). Aunque el circuito pierde dos posiciones en el ranking, el empeoramiento de su posición, que se mide con el tiempo de restauración, no llega ni a un 5%. Esta situación puede hacer que a una partícula no le importe tanto ir hacia “atrás” dado que tampoco sufre una merma sustancial en su función objetivo.
- En segundo lugar, y más importante, hay que tener en cuenta las relaciones de contención que existen entre los circuitos y sus caminos servidores. Esta interdependencia tiene una implicación clara en los movimientos de las partículas dentro del espacio de ordenamiento. Como ya se expuso en el planteamiento del problema, algunas de las entidades afectadas por un corte son caminos servidores que contienen varios circuitos, de manera que si se restaura el camino servidor automáticamente quedan restaurados los circuitos contenidos. Así por ejemplo

imaginemos que un circuito (partícula), en una cierta iteración del algoritmo PSO se encuentra en la posición 20 del ranking, y que el valor de su función objetivo en esa posición (su tiempo de restauración) es $P_i = 40$ minutos. Imaginemos que por el movimiento de todas las partículas, en la siguiente iteración la partícula cae a la posición 30 del ranking, sin embargo resulta que en el corte también estaba implicado su camino servidor, y que este ha pasado a estar ahora en la posición 10. El efecto que ha tenido esta iteración, dado que al restaurar el camino servidor, automáticamente también se restaura el circuito contenido, es que la partícula ve mejorada su función objetivo, que coincidirá con la función objetivo del camino servidor de la posición 10 del ranking, y que podría ser por ejemplo $P_{i+1} = 15$ minutos. Esto hace que, dentro de la mecánica del funcionamiento del algoritmo PSO, la partícula vea como positivo desplazarse hacia atrás en el ordenamiento. Esto lo ve desde su propio punto de vista de partícula aislada, evidentemente, en el movimiento final de cada iteración influye también la tendencia global del enjambre.

La conclusión de estas interdependencias es que el movimiento de las partículas, por sí mismas, por su propio interés medido en términos de su función objetivo, sin tener en cuenta la influencia del enjambre, puede ser tanto hacia adelante como hacia atrás en el espacio de ordenación. Sobre todo para las partículas que representan a circuitos finales. En el caso de partículas que representen a caminos servidores la afirmación anterior es discutible y probablemente siempre tiendan a ir hacia adelante en la ordenación, si atendemos únicamente a su propio interés, dado que no hay a priori ninguna situación en la que al camino le interese dejarse ser adelantado (salvo que sea por otro camino que lo contenga a él).

5.7.1. Ejecución de las iteraciones paso a paso

Una vez fijada la forma de utilizar el algoritmo PSO, identificando cada partícula con una de las entidades afectadas por el corte (opción B), en este apartado vamos a describir paso a paso las iteraciones del algoritmo con un ejemplo simple, formado únicamente por 10 entidades cortadas. Este ejemplo servirá como base para generalizar el funcionamiento, e incluso como pseudo-código de la implementación realizada.

Partamos de un listado de entidades afectadas por un corte de red, cuyos identificadores los nombraremos con letras para no confundirlo con la ordenación a la que se van a someter:

[A, B, C, cD, E, F, G, H, I, J]

Supongamos que la entidad cD es realmente un camino contenedor de los circuitos E, F y G, y que por tanto su restauración supone la restauración automática de dichos tres circuitos.

Supongamos que los valores de los tiempos de restauración de cada una de las entidades, de manera independiente (es decir, realizándose una medición de manera aislada, únicamente dependiendo de las características del camino o circuito), son los siguientes:

- cD: 20 minutos
- C, F: 15 minutos
- A, B, E: 10 minutos
- G, H: 7 minutos

- I: 5 minutos
- J: 3 minutos

Inicialización del algoritmo

Para iniciar el algoritmo es necesario asignar unas posiciones aleatorias iniciales a cada partícula (vector P_1), y también unas velocidades iniciales (vector V_1). Supongamos que son las siguientes (representadas en forma de vector, con respecto al vector de identificación de las partículas):

Iteración 1.

Identificación de las partículas: [A, B, C, cD, E, F, G, H, I, J]

$P_1 = [4, 3, 6, 2, 5, 1, 7, 9, 10, 8]$

$V_1 = [-2, 3, 1, -4, 2, -1, 1, 2, 3, 5]$

El dígito de la posición indica la posición relativa de cada partícula dentro de una lista ordenada, entendiendo que el valor 1 representa al elemento que estaría en primer lugar de la lista ordenada, y el valor 10 representa al último. Es decir con el vector de posiciones P_1 la lista ordenada de entidades, de izquierda a derecha sería la siguiente:

[F, cD, B, A, E, C, G, J, H, I]

Como estamos en la primera iteración, el vector P_1 es la mejor posición de las partículas hasta ahora (es la única).

En un algoritmo PSO genérico la velocidad de cada partícula es un vector de tantas coordenadas como dimensión tenga el espacio. En nuestro caso el espacio es una recta con lo que la velocidad se reduce a sólo un número, pero eso sí, puede ser positivo o negativo. Positivo indicará un desplazamiento alejándose de la primera posición de la lista ordenada, y negativo lo contrario.

Tras aplicar el vector de velocidades a la posición inicial, obtenemos la nueva posición de las partículas. Partiendo del convenio sobre velocidades que hemos establecido es muy fácil obtener la nueva posición porque basta con sumar ambos vectores P_1 y V_1 , componente a componente para hallar P_2 :

Ids: [A, B, C, cD, E, F, G, H, I, J]

$P_1 = [4, 3, 6, 2, 5, 1, 7, 9, 10, 8]$

$V_1 = [-2, 3, 1, -4, 2, -1, 1, 2, 3, 5]$

$P_2 = [2, 6, 7, -2, 7, 0, 8, 11, 13, 13]$

A la vista del resultado nos encontramos con dos problemas que debemos resolver, que es la aparición de posiciones repetidas y posiciones fuera del rango permitido. Para solucionarlos podemos aplicar la siguiente lógica (que he pasado a denominar corrección por “reubicación cíclica”):

- Supondremos que el espacio es cíclico, y que los límites de las posiciones son de 1 a 10, por tanto cualquier valor que se salga del rango hará que aparezca por el extremo opuesto del rango. O sea, un valor 11 lo convertiremos en un 1, un valor 0 en un 10, y un -1 en un 9, por

poner algunos ejemplos. Quizá con una cantidad pequeña de entidades este movimiento puede desvirtuar la inercia de las partículas, ya que moverse hacia adelante en el orden puede provocar, si se llega al límite inferior, que se ponga el último de la fila. En un conjunto mayor de partículas este efecto se ve minimizado porque sólo afectaría a un pequeño número de ellas, a las que están cercanas a los extremos, primeras o últimas.

- En caso de colisión, es decir que dos partículas ocupen la misma posición, la última que haya llegado, se desplazará una posición hacia la derecha (alejándose de la primera posición del orden). Si vuelve a colisionar, se vuelve a desplazar una posición hasta que encuentre un hueco en la ordenación.

Aplicemos ambas reglas, primero la de no salirse de los límites establecidos (que matemáticamente hablando consiste en sumar 10 a los resultados menores de 1, y restar 10 a los mayores de 10) con lo que obtendríamos:

$$P_2 = [2, 6, 7, 8, 7, 10, 8, 1, 3, 3]$$

A continuación eliminemos las colisiones, obteniendo:

$$P_2 = [2, 6, 7, 8, 9, 10, 4, 1, 3, 5]$$

Lo que ha ocurrido es que la quinta componente del vector, el valor 7, estaba colisionando con un valor 7 que ya existía en la componente tercera; al sumar uno se obtiene el valor 8 que también colisiona con la cuarta componente, con lo que sumamos uno más y se queda en valor 9. La séptima componente, valor 8 también colisiona con la cuarta; al sumar uno, valor 9, también colisiona, y sigue colisionando hasta que se estabiliza en el valor 4. Por último, la última componente (valor 3) también colisiona, y sumando uno, un par de veces, se estabiliza en el valor 5.

Es decir, traducido a la ordenación de las entidades, lo que quedaría es:

$$[H, A, I, G, J, B, C, cD, E, F]$$

Figura 63: Aplicación de PSO. Corrección de salidas de límites y duplicados

Otra opción para resolver la aparición de posiciones duplicadas y fuera de rango es aplicar una corrección que mantenga la ordenación, y mueva hacia adelante o hacia atrás en la ordenación esas posiciones duplicadas. La he denominado corrección por "compresión de rango". Es decir, consiste en realizar una distribución, manteniendo el orden inicial, en la medida de lo posible, y manteniendo los límites del espacio. Para ello se recorre la lista de menor a mayor valor de posición, asignando las posiciones corregidas empezando en la 1 y terminando en la 10 de forma correlativa. Así en el ejemplo anterior hubiese quedado:

$$P_2 = [2, 6, 7, -2, 7, 0, 8, 11, 13, 13]$$

$$P_2 = [3, 4, 5, 1, 6, 2, 7, 8, 9, 10]$$

Lo cual es el resultado de realizar las siguientes correcciones:

$$-2 > 1$$

$$0 > 2$$

$$2 > 3$$

$$6 > 4$$

$$7 > 5$$

$$7 > 6$$

$$8 > 7$$

$$11 > 8$$

$$13 > 9$$

$$13 > 10$$

Evaluación de las posiciones individuales

Ahora que tenemos una nueva posición de las partículas es el momento de evaluar si ha habido mejora, tanto en la posición individual partícula a partícula, como en la posición global del enjambre.

Recordemos que el análisis individual de una partícula que se basa exclusivamente en el tiempo total de restauración del circuito al que representa esa partícula, y que se calcula sumando su propio tiempo de restauración con la cantidad acumulada del tiempo gastado en restaurar todos los circuitos que están delante en la ordenación. Simplificamos aquí considerando que no existen reparaciones en paralelo, sino que las de todos los circuitos se restauran en serie por un mismo equipo de mantenimiento.

El resultado del análisis individual se expresa en la siguiente tabla:

Partícula	Posición en P1	Iter. 1. T Fin Restauración (minutos)	Posición en P2	Iter. 2. T Fin Restauración (minutos)	Mejor posición
A	4	45+10=55	2	7+10=17	2 en P2
B	3	35+10=45	6	32+10=42	6 en P2
C	6	55+15=70	7	42+15=57	7 en P2
cD	2	15+20=35	8	57+20=77	2 en P1
E	5	35 (=cD)	9	77 (=cD)	5 en P1
F	1	15	10	77 (=cD)	1 en P1
G	7	35 (=cD)	4	22+7=29	4 en P2
H	9	73+7=80	1	7	1 en P2
I	10	80+5=85	3	17+5=22	3 en P2
J	8	70+3=73	5	29+3=32	5 en P2

Estudiemos en profundidad algunos valores que se han producido en el cálculo del tiempo final de restauración de cada partícula en la iteración 1:

- El tiempo de restauración de la partícula que está en la primera posición (circuito F) es únicamente el suyo propio (15 minutos).
- Claramente se ve el cálculo del tiempo de restauración de la partícula que está en la segunda posición (camino cD) es el suyo propio (20 minutos) más lo que se ha tardado en el primer circuito (15), $15+20=35$.

- Puesto que cD es un camino servidor que realmente contiene a los circuitos E, F y G, restaurar el camino tiene como consecuencia automática que recuperan la comunicación esos tres circuitos. Por eso el tiempo de restauración de E y G también es el mismo: 35 minutos. Aunque F también está contenido, ya había sido restaurado el primero, en el minuto 15, así que no le afecta el estar contenido dentro del camino cD.
- El circuito en tercera posición (el B) se restaura en el minuto 45 debido a que por sí mismo necesita 10, y que el tiempo transcurrido antes de llegar a él había sido 35 minutos.
- Los circuitos en las posiciones 5 y 7 de la lista (circuitos E y G) no “retrasan” en nada la restauración de los circuitos que van detrás de ellos, ya que fueron restaurados conjuntamente con el camino cD.
- El último circuito, en la posición 10, es el I, y finaliza su restauración pasados 85 minutos tras el inicio del corte, marcando así el final de la avería.

Analicemos ahora los valores obtenidos en la iteración 2:

- El primer circuito de la ordenación es el H ($X_H^2 = 1$), que por sí sólo tiene un tiempo de restauración de 7 minutos. Por tanto, al comparar ese tiempo con el que el mismo circuito H obtuvo en la primera iteración, en la que estaba en la posición $X_H^1 = 9$, y que fueron 80 minutos, claramente su mejor posición hasta el momento, dentro de la lista ordenada, es la posición 1 obtenida en la iteración 1. En nomenclatura de algoritmo PSO la mejor posición de H hasta el momento es $P_H = 1$, y el valor de la función objetivo en esa posición, el “fitness” es $PBest_H = 7$ minutos.
- Si nos fijamos en el circuito A, su posición en la segunda iteración es $X_A^2 = 2$, y su tiempo de restauración es el del primero más el suyo propio: $7+10 = 17$. Este tiempo también es menor que el obtenido en la primera iteración, que fueron 55 minutos, debido a estar posicionado en la cuarta posición $X_A^1 = 4$. Por tanto su mejor posición $P_A = 2$, y el valor de la función objetivo en esa posición es $PBest_A = 17$ minutos.
- Pero miremos en detalle ahora el circuito B. Este circuito es un ejemplo de que ir hacia atrás en la ordenación, a veces, puede suponer acabar siendo restaurado antes. Esto que en principio puede sonar contradictorio tiene su explicación por las relaciones e interdependencias que existen entre las diferentes entidades, como ya se comentó. En la iteración 1 su posición era $X_B^1 = 3$, y su tiempo de restauración fue de 45 minutos. Sin embargo en la iteración 2 su posición es $X_B^2 = 6$, y su tiempo de restauración ha sido de 42 minutos. Es decir, aunque ha empeorado tres puestos en la ordenación ha sido reparado 3 minutos antes. Bajo esta perspectiva, y considerándose de manera aislada, la inercia propia de la partícula será la de ir perdiendo puestos en la ordenación (matemáticamente, incrementar el valor de su posición) ya que así mejora su función objetivo. Su mejor posición tras la segunda iteración es $P_B = 6$, y el valor de la función objetivo en esa posición es $PBest_B = 42$ minutos.
- Al igual que el circuito B, el circuito C también mejora su función objetivo en la segunda iteración, al retrasarse una posición en el orden, y pasar de la posición 6 (tiempo de 70 minutos), a la posición 7 (tiempo de 57 minutos). Tenemos entonces que su mejor posición es $P_C = 7$, con un “fitness” de $PBest_C = 57$ minutos. Su búsqueda de la mejor posición desde el

punto de vista individual también le dirá a este circuito que es mejor retrasarse en la ordenación.

- El último circuito, en la posición 10, es el F, que, aún estando el último en la lista ordenada realmente se restaura a la vez que el cD y el E, en el minuto 77. Curiosamente este circuito ha pasado de estar el primero en la iteración 1, a estar el último en la segunda iteración. Por tanto mantiene como mejor posición la de la iteración 1: $P_F = 1$.

Evaluación de la posición global del enjambre

Ahora llega el momento de evaluar el enjambre de forma global. Una vez que se han movido todas las partículas tras la iteración 2, tenemos una nueva ordenación de los circuitos. Hay que averiguar si esta nueva ordenación global es “mejor” que la anterior. Como ya se explicó en el planteamiento inicial, la forma de realizar esa comparación será aplicando el método ELECTRE I, usando los 5 criterios que se definieron en un principio:

- Coste material de ejecutar la reparación.
- Coste humano de ejecutar la reparación.
- Coste directo de las penalizaciones por incumplimiento de la calidad de servicio contratada por los clientes afectados.
- Cese de ingresos por los clientes descontentos que rescinden su contrato y se cambian de operadora.
- Repercusión mediática

Se construye entonces la **matriz decisional inicial**, necesaria para lanzar un método ELECTRE I, usando las funciones de utilidad con todos los atributos de los circuitos que se definieron en el apartado en el que se describe el uso de este método multicriterio. El resultado son los siguientes valores para la matriz:

Alternativas	Coste material (u.m.)	Coste humano (u.m.)	Penalizaciones (u.m.)	Cese de ingresos (u.m. /mes)	Repercusión mediática (min.)
A1: Posiciones en Iteración 1.	25	11	33	14	32
A2: Posiciones en Iteración 2.	5	9	41	15	23
Vector de Pesos	0,14	0,16	0,08	0,25	0,37
“Más es mejor”	-1	-1	-1	-1	-1

El resultado del método, en este caso, es que la alternativa A2 sale ganadora, es decir la posición global en la segunda iteración es la mejor por el momento.

$$G = P_2 = [2, 6, 7, 8, 9, 10, 4, 1, 3, 5]$$

Lista ordenada = [H, A, I, G, J, B, C, cD, E, F]

Pongamos los datos en forma de tabla para comparar la mejor posición de cada partícula desde el punto de vista del enjambre y desde el punto de vista de cada partícula individual:

Partícula	Mejor posición según el enjambre	Mejor posición según la partícula
A	2	2
B	6	6
C	7	7
cD	8	2
E	9	5
F	10	1
G	4	4
H	1	1
I	3	3
J	5	5

Como sólo se ha ejecutado una iteración, es normal que para muchas partículas la mejor posición según el enjambre y la partícula coincidan. Sin embargo también aparecen tres partículas, la cD, E y F, para las que la partícula tiende a una posición, pero por el bien del enjambre, la influencia del mismo les dicta que vayan a otra. Ahí radica, de hecho, el funcionamiento del PSO, en la combinación de esas dos influencias.

Nuevas velocidades y siguiente iteración

El siguiente paso, tal y como dicta el algoritmo PSO es la actualización de la velocidad de cada partícula, para la siguiente iteración, según la siguiente fórmula:

$$V_i = \alpha * V_i + \beta * \text{rand}() * (P_i - X_i) + \gamma * \text{rand}() * (G_i - X_i)$$

Donde $\text{rand}()$ son números aleatorios, y α , β y γ son los parámetros que regulan el comportamiento del modelo. Son los responsables de que haya un equilibrio entre la amplitud de la exploración, dentro del universo de búsqueda, y la funcionalidad operativa del algoritmo.

- La variable α representa al factor de inercia de la partícula. Modula cómo la velocidad de la iteración anterior, influye en la velocidad de la siguiente iteración. Un valor menor que uno hará que la partícula se vaya “frenando” en las siguientes iteraciones, y por tanto vaya explorando menos ámbito en el espacio. Por el contrario, un valor mayor que

uno hará que la partícula vaya “acelerando” sin límites. Precisamente uno de los principales inconvenientes de PSO es que debido al rápido incremento de la velocidad de las partículas, el algoritmo podría caer fácilmente en óptimos locales perjudicando a la exploración en el espacio de búsqueda. Para evitar esto hay que incorporar mecanismos que controlen el crecimiento de la velocidad como la inercia o el factor de constricción, como el comentado en [89].

- La variable β representa la influencia de la memoria de la partícula, que hace que la partícula tienda hacia su mejor posición en el pasado.
- La variable γ representa a la influencia del enjambre, la cual hace que la partícula tienda hacia la mejor posición en el enjambre.
- El resto de variables son X_i que es la posición actual de la partícula, P_i que es la mejor posición de la partícula hasta el momento, y G que es la mejor posición desde el punto de vista global, de todo el enjambre. Recordemos que si usáramos una relación de vecindario local, tendríamos varias G_s .

Calculemos en detalle el vector de velocidades para la siguiente iteración, con los datos de partida de la iteración 2. Puesto que las posiciones de las partículas tras la iteración 2 coinciden con la mejor posición global desde el punto de vista del enjambre, tendremos que en este paso: $(G_i - X_i) = 0$. Calculemos ahora la tabla de resultados de $(P_i - X_i)$:

Partícula	Posición actual X_i	Mejor posición según la partícula P_i	$(P_i - X_i)$
A	2	2	0
B	6	6	0
C	7	7	0
cD	8	2	-6
E	9	5	-4
F	10	1	-9
G	4	4	0
H	1	1	0
I	3	3	0
J	5	5	0

Vemos que para las partículas A, B, C, G, H, I, J no va a influir su memoria de su mejor posición particular en la nueva velocidad, ya que justamente en esta iteración todas esas partículas ya se encuentran en su mejor posición.

Supongamos unos valores de $\text{rand}() = 0,5$ y $\alpha = 0,8$, $\beta = 0,5$ y $\gamma = 2$. Con estos valores, en la siguiente tabla se muestran los pasos para calcular la nueva posición, añadiendo a X_i los valores de V_i y obteniendo así la nueva X_i , es decir, usando la fórmula $X_i^3 = X_i^2 + V_i^2$:

Partícula	Velocidad anterior V_i^1	Velocidad nueva V_i^2	Posición anterior X_i^2	Nueva posición $X_i^3 = X_i^2 + V_i^2$
A	-2	-2	2	0
B	3	2	6	8
C	1	1	7	8
cD	-4	-5	8	3
E	2	1	9	10
F	-1	-3	10	7
G	1	1	4	5
H	2	2	1	3
I	3	2	3	5
J	5	4	5	9

A continuación sería necesario un postprocesado de las nuevas posiciones para que no queden fuera de los límites del espacio de búsqueda (1-10) ni se produjeran duplicados. Pero antes de realizar esa operación veamos el efecto de variar ligeramente los valores de α y de β (no se ha tenido en cuenta la variación de γ porque en esta iteración no está influyendo):

Partícula	Nueva posición $\alpha = 0,8 \quad \beta = 0,5$	Nueva posición $\alpha = 0,5 \quad \beta = 0,8$	Nueva posición $\alpha = 0,5 \quad \beta = 2$	Nueva posición $\alpha = 1 \quad \beta = 1$
A	0	1	1	0
B	8	8	8	9
C	8	8	8	8
cD	3	4	0	1
E	10	8	6	9
F	7	6	1	5
G	5	5	5	5
H	3	2	2	3
I	5	5	5	6
J	9	8	8	10

Vemos que su variación influye, y modifica el resultado obtenido. En cualquier caso, una vez elegidos unos valores de α , de β y de γ , estos valores se mantendrán durante todas las iteraciones.

Tras ser obtenida la nueva posición, de nuevo hay que evaluar si ha habido mejora, tanto en la posición individual partícula a partícula, como en la posición global del enjambre. Recordemos que el análisis individual de una partícula que se basa exclusivamente en el tiempo total de restauración del circuito al que representa esa partícula, y que el análisis de la mejor posición global se basa en la utilización de ELECTRE I, comparando la última ordenación obtenida con la mejor alternativa global de ordenación hasta ese momento.

Al final de cada iteración se evalúa si se ha alcanzado la condición de parada (establecida por el usuario) y:

- Si no se ha alcanzado la condición de parada, se realiza una nueva iteración.
- Si la condición se cumple, se devuelve la última mejor posición encontrada y se finaliza el algoritmo.

La condición de parada más adecuada a este problema sería la de tiempo máximo de computación, ya que lo que deseamos es conseguir tener una ordenación rápidamente y enviar al equipo de reparaciones a realizar sus tareas de restauración sobre la red. Sin embargo para poder hacer comparativas de rendimiento con el resto de métodos, se ha utilizado como condición de parada un número máximo de iteraciones.

5.7.2. Mediciones

Desglosemos los pasos que se ejecutan en el algoritmo para ver como se distribuye el tiempo de computación. En cada iteración del algoritmo es necesario ejecutar el siguiente listado de tareas:

Tarea	Tiempo de computación
Aplicar las velocidades a la posición actual para calcular las nuevas posiciones de todas las entidades	Bajo
Corrección de posiciones por fuera de límite y duplicados de posición	Bajo
Evaluación de las posiciones individuales de cada entidad.	Medio
Evaluación de la nueva posición global con respecto a la mejor existente, aplicando ELECTRE I. Incluye el cálculo de los Criterios para las dos alternativas evaluadas.	Medio
Cálculo de la nueva velocidad para cada entidad	Bajo

Para la realización de las simulaciones se ha realizado un desarrollo en el entorno MATLAB, basado en las librerías disponibles en el Particle Swarm Optimization Toolbox. Ha sido necesario realizar adaptaciones para incluir la evaluación de la situación global mediante el método ELECTRE I.

Para realizar las mediciones de rendimiento se aplica el mismo banco de pruebas que para todos los métodos:

- Cantidad de conjuntos de circuitos cortados: 82
- Distribución de la muestra de entidades: desde 40 a 840 entidades, usando dos conjuntos de datos de cada cantidad.

Se muestra a continuación el tiempo que se tarda, en una iteración, en evaluar la nueva posición global del enjambre, desglosando el detalle del tiempo de cálculo de todos los criterios necesarios para la aplicación del método ELECTRE I, sobre las dos alternativas en discusión (la posición actual del enjambre, y la mejor posición hasta el momento).

El resultado es el siguiente:

Figura 64: Tiempo de la Evaluación Global de Posición (seg.) en una iteración de PSO

Si ahora sumamos todos los tiempos de todas las tareas que intervienen en una iteración completa del método, obtenemos:

Figura 65: Tiempo Total (seg.) en una iteración de PSO

Con estos tiempos conseguimos el resultado tras una iteración, ahora bien, la pregunta es ¿cuántas iteraciones necesito para encontrar una buena solución?, y a continuación otra pregunta evidente es ¿qué es una buena solución?.

Como ya se explicó, los parámetros que gobiernan el algoritmo PSO son los parámetros que gobiernan la velocidad de las partículas en cada iteración:

- α que es el factor de inercia de la partícula.
- β que representa la influencia de la memoria de la partícula.
- γ que representa a la influencia del enjambre.

Tener valores “altos” de estas variables implicará valores altos de velocidad lo cual hará que cada partícula se mueva mucho, es decir, se mueva dentro de una amplio abanico de posiciones en la lista ordenada. Lo bueno de esto es que la partícula explorará muchas posiciones y muy diferentes, muy separadas en la lista, con lo que el algoritmo estará realizando una buena exploración de todo el espacio de búsqueda disponible de soluciones. Lo malo es que será más difícil que todas las partículas converjan hacia una solución estable. En el caso peor nunca se conseguirá dicha convergencia.

El llegar o no a converger en una solución puede medirse analizando la mejor posición global que se produce tras cada iteración:

- Si la mejor posición global, está continuamente variando en cada iteración, evidentemente aún no se habrá encontrado una buena solución.
- Si en cambio, la mejor posición global no varía tras unas cuantas iteraciones, querrá decir que se ha encontrado algún tipo de solución óptima. Quizá sea una solución óptima parcial, debido quizá a que se haya acotado demasiado la libertad de movimiento de las partículas, pero en cualquier caso será una solución que las siguientes iteraciones no pueden mejorar.

Hay que conseguir un compromiso entre la amplitud de exploración del universo de partículas y la cantidad de iteraciones necesarias para lograr una solución estable.

Se ha establecido que una solución de mejor posición global, es estable (converge), si no cambia durante 7 iteraciones, siempre que se respete que el número mínimo de iteraciones, con cambio de posición, sea mayor que 15. Es decir, en caso de que antes de llegar a la iteración 22, hayan pasado 7 iteraciones consecutivas sin cambio de la mejor posición global se considerará que se ha alcanzado un mínimo local, y para escapar de él se varían α , β , γ .

Entre todas las combinaciones de parámetros ensayadas, en las siguientes gráficas se muestran los datos con tres conjuntos de parámetros diferentes gobernando las variaciones de velocidad:

- $\alpha=2$; $\beta=1$; $\gamma=0,9$ (poca inercia)
- $\alpha=8$; $\beta=0,6$; $\gamma=1,2$ (inercia media y poca memoria de la partícula).
- $\alpha=15$; $\beta=1,5$; $\gamma=2$ (alta inercia, alta memoria de la partícula y alta influencia del enjambre).

La cantidad de iteraciones necesarias para lograr la convergencia, es decir, una mejor posición global estable, han sido las siguientes:

Figura 66: Cantidad de iteraciones en PSO para solución estable

Se ha decidido como límite superior las 150 iteraciones, dado que en las condiciones del entorno de pruebas, por encima de ese límite los tiempos de computación excedían por mucho la cantidad de una hora, y esos tiempos ya no son razonables para el problema tratado. El otro límite establecido ha sido un tiempo total de ejecución superior a 2 horas (al alcanzar ese tiempo se aborta la simulación).

Nótese que con la combinación $\alpha=15$; $\beta=1,5$; $\gamma=2$, superados las 480 entidades en el universo de ordenación, no se ha conseguido solución estable una vez llegadas a las 150 iteraciones previstas como máximo. Y con la combinación $\alpha=8$; $\beta=0,6$; $\gamma=1,2$ ocurre el mismo efecto al llegar a las 780 entidades.

Los tiempos globales de ejecución han sido:

Figura 67: Tiempo ejecución (seg.) en PSO para solución estable

5.7.3. Conclusiones particulares

La ventaja principal que encontramos es que el método no necesita alternativas predefinidas. Parte de una ordenación inicial aleatoria, y a partir de ahí explora con libertad el espacio de búsqueda, de acuerdo a los parámetros que rigen la velocidad de las partículas. Estos tres parámetros son:

- α que es el factor de inercia de la partícula.
- β que representa la influencia de la memoria de la partícula.
- γ que representa a la influencia del enjambre.

Dar mayor valor a uno u otro supone orientar en un determinado sentido el movimiento primordial de las partículas dentro del espacio de búsqueda. Usar valores “altos” de estas variables implicará que cada partícula se mueva mucho en cada iteración, es decir, se explorará mayor variedad de soluciones. El problema es que se necesitarán entonces muchas iteraciones para conseguir la convergencia a una solución final.

Si no se le ponen límites de tiempo de ejecución el algoritmo va mejorando las soluciones encontradas hasta encontrar una solución estable (siempre dependiendo de α , β y γ). El problema es que con el entorno de simulación utilizado, y para una cantidad de entidades cortadas del orden de 800, el tiempo para alcanzar la estabilidad ronda las dos horas.

Si se impone una restricción al tiempo de ejecución, evidentemente la solución final no será tan óptima como si se le hubiera dejado más tiempo de procesamiento. Pero eso demuestra que el problema no es ya tanto del algoritmo, sino de los recursos *hardware* / *software* que se dediquen a ello. Es decir podemos intercambiar el factor de calidad de la solución por el de recursos invertidos, o dicho de otro modo, cuánto más invierta en los recursos necesarios para ejecutar el algoritmo, mejores soluciones proporcionará, y en menor tiempo. Ya no tendríamos un problema de dificultad de ordenación sino un problema monetario.

Esta característica anterior diferencia este método del resto de los utilizados. En el resto de algoritmos que hemos aplicado hasta ahora (ELECTRE, AHP, Redes Neuronales) el tiempo de ejecución es fijo, es decir, al algoritmo se le proporcionan los datos de entrada, el algoritmo se ejecuta en el tiempo que necesita, y el algoritmo acaba entregando los resultados. Sin embargo utilizando PSO, cuanto mayor tiempo se le deja ejecutarse, más explora el espacio de búsqueda y va encontrando mejores soluciones. La exploración se estanca cuando ya no se encuentra una mejor posición global de las partículas. Pero con una adecuada elección de los parámetros que gobiernan la velocidad (α , β y γ) esto no tiene por qué ocurrir de forma prematura (hay que evitar los óptimos locales).

Para poder comparar este método con el resto, se han elegido los valores $\alpha=8$; $\beta=0,6$; $\gamma=1,2$, que constituyen un compromiso entre una buena libertad de exploración, y un tiempo de ejecución no demasiado excesivo (se descartó la combinación $\alpha=2$; $\beta=1$; $\gamma=0,9$ porque producía óptimos locales con relativamente pocas iteraciones). En cualquier caso el límite máximo de tiempo de ejecución se ha fijado en 120 minutos, aunque no se haya alcanzado una solución estable.

Adicionalmente para acercar aún más esta implementación de PSO a las condiciones del resto de algoritmos (tiempo de ejecución comparable), se ha usado también otra versión limitada con condición de parada forzada de 45 iteraciones, lo cual con los factores de velocidad escogidos supone unos tiempos de ejecución de unos 1000 segundos (o sea, entre 15 y 20 minutos).

Para conseguir un buen compromiso entre la profundidad de exploración y el tiempo disponible de computación es necesario ejecutar el algoritmo sobre un sistema basado en un *HW/SW* de altas prestaciones. Adicionalmente se mejora mucho el rendimiento de la búsqueda realizando una implementación de PSO con procesamiento en paralelo. La implementación propuesta en este sentido se basaría en lanzar varios procesos de búsqueda PSO en paralelo, sobre todo el universo de búsqueda, y cada cierto tiempo realizar una puesta en común de la mejor solución encontrada por cada proceso. Dichas soluciones serían evaluadas entre sí, y la mejor de todas ellas sería establecida como mejor hasta el momento en todos los procesos, continuando así la exploración. En cualquier caso este planteamiento forma parte de las líneas futuras de investigación ya que no se ha desarrollado en el presente trabajo.

6. COMPARATIVA DE RESULTADOS DE LOS ALGORITMOS USADOS

En el mundo actual en que vivimos, dominado por la economía capitalista, el principal factor, por no decir el único, que considerará una empresa para decidir cuál es el mejor método de todos, será el económico. Si una compañía operadora de telecomunicación decide invertir dinero en la construcción de un sistema informático, es porque piensa que aumentará sus ingresos y/o disminuirá sus gastos, con la implantación y utilización del mismo.

Pero es difícil demostrar las ventajas de utilizar o no un sistema, o de implantar un sistema con respecto a otro, si no se implanta el sistema realmente. Todo lo que podremos demostrar, todos los números, cantidades y gráficas que podremos presentar a nuestro cliente (la compañía), para convencerle de que nos compre o nos financie nuestro sistema, serán sólo aproximaciones. Sólo si el sistema se utiliza en la realidad, durante un tiempo, se podrán tener mediciones de parámetros (normalmente económicos) y se podrán comparar con la situación anterior en la que el sistema no existía (no se utilizaba).

Y aún así, puede haber factores externos que distorsionen dicha comparación, porque el entorno exterior en el que se desenvuelve una empresa, también es cambiante. Los resultados económicos de una empresa pueden variar mucho entre un año bueno y un año de crisis. En uno de crisis, por ejemplo, probablemente se tendrá un descenso de los clientes, no porque el servicio de la compañía sea haya degradado en calidad, sino simplemente porque los clientes no dispondrán de dinero para contratar el servicio. Es decir, aunque implantemos un nuevo sistema muy bueno y eficiente, no se verán los beneficios globales si coincide con el inicio de un periodo de recesión económica en el entorno.

En cualquier caso, debemos realizar esas aproximaciones y componer unas métricas para poder comparar los diferentes métodos expuestos en este trabajo de tesis.

6.1. Condiciones del entorno de pruebas

Partimos de la premisa que cualquiera de los métodos, implementado como sistema de ayuda al mantenimiento, se va a desplegar sobre la misma infraestructura *hardware*, para poder realizar comparativas en las mismas condiciones.

La máquina utilizada para las pruebas tiene las siguientes características:

- Sistema operativo Microsoft Windows XP Profesional. Versión 2002. Service Pack 3.
- Procesador Intel Core 2 CPU T5600 a 1,83 GHz.
- Memoria RAM: 1 GByte.
- Disco duro para datos: 30 GBytes.

Figura 68: Sistema Operativo y Equipo de prueba

El *software* utilizado para realizar las simulaciones ha sido el paquete MATLAB con diferentes *Toolbox*. También Priest y Expert Choice para AHP. DecisionLab para PROMETHEE. Y apoyándonos también en cálculos intermedios hechos mediante Microsoft Excel.

Para la medición de tiempos de ejecución, los procesos que por decisión de modelado se pueden ejecutar en paralelo, se han simulado ejecutándolos en serie, puesto que de otra manera se desvirtúa la comparativa con otros algoritmos que no disponen de esa característica de procesamiento paralelo. Esto es así porque el procesamiento paralelo necesita *hardware* adicional, y la premisa de comparación es que todos los algoritmos se ejecuten sobre el mismo *hardware*.

Además a todos los algoritmos se les ha alimentado con los mismos bancos de datos de prueba. Podemos diferenciar dos tipos de bancos de prueba dependiendo de la característica que se desea medir.

Así, para las mediciones de la sensibilidad de los algoritmos respecto a la cantidad de entidades presentes en cada incidencia o corte de red, el banco de pruebas usado tiene las siguientes características:

- Cantidad de conjuntos de circuitos cortados: 82
- Cantidad de entidades cortadas que hay en cada conjunto:
 - Máxima: 840
 - Mínima: 40
 - Distribución: valores de cantidades, entre el máximo y el mínimo, con 20 unidades de diferencia de un valor al siguiente. Es decir, 41 valores distintos entre 40 y 840. Para cada valor x de cantidad de entidades, se han elegido dos conjuntos diferentes de

entidades, con la misma cantidad x , tomando como medida el valor medio resultante de la métrica que corresponda. Es decir, dos conjuntos de 40 entidades, dos conjuntos de 60, dos conjuntos de 80, etc. En total forman los 82 conjuntos mencionados. Y si lo que se está midiendo, por ejemplo, es el tiempo de ejecución de 40 entidades, se toma el valor medio del tiempo de ejecución de los dos conjuntos de 40 entidades.

Figura 69: Banco de pruebas para comparar tiempos de ejecución

Por otro lado, para las mediciones relativas al comportamiento general de los algoritmos con una misma cantidad de entidades presentes en cada incidencia o corte de red, el banco de pruebas usado tiene las siguientes características:

- Cantidad de conjuntos de circuitos cortados (incidencias de red): 30
- Cantidad de entidades cortadas que hay en cada conjunto:
 - Máxima: 900
 - Mínima: 800
 - Distribución: varios valores entre el máximo y el mínimo. Dichas cantidades corresponden a casos habituales reales que pueden producirse en cortes de red, para una red de un operador de telecomunicación de tamaño medio. Es decir, para una red que tenga una capacidad de varios cientos de miles de clientes.
 - Composición: en este caso, la cantidad de entidades que tiene cada conjunto no es un dato relevante para las mediciones que se quieren obtener, sino que lo más importante es la composición, es decir, los diferentes atributos que tienen las entidades que componen cada conjunto. Al ser conjuntos correspondientes a cortes reales, la composición es aleatoria:
 - un conjunto puede tener muchos circuitos con reclamaciones, y otro conjunto puede tener muy pocas,

- un conjunto puede tener muchos circuitos de clientes importantes y otro tener, en cambio, la gran mayoría de circuitos pertenecientes a clientes residenciales,
- etc.

Figura 70: Banco de pruebas para comparar métodos entre sí

6.2. Comparativa de algoritmos con las mismas alternativas

En este apartado se comparan los tres algoritmos utilizados en el presente trabajo en los que se han utilizado el mismo conjunto de alternativas de solución. Estos han sido:

- ELECTRE I
- AHP
- Red Neuronal opción A

Recordemos que las alternativas utilizadas en los tres casos han sido:

- A. Mayor importancia a los críticos.
- B. Mayor importancia al tiempo de reclamación.
- C. Reclamados por categoría.
- D. Acción sobre capa servidora por criticidad.
- E. Acción sobre capa servidora por reclamaciones.

Evidentemente, puesto que el conjunto de alternativas es reducido (sólo cinco), en muchas ejecuciones varios métodos han provocado como resultado la misma alternativa. Incluso a veces los tres métodos han coincidido en elegir la misma. A continuación se muestra la tabla con los datos de las diferentes alternativas elegidas (entre las cinco posibles: A, B, C, D y E) por estos tres métodos,

en todo el conjunto de ejecuciones de prueba que se han utilizado (30 cortes de entidades, identificados del 1 al 30):

Identificador de conjunto	Cantidad Entidades	Electre I	AHP	Red Neuronal opción A	Coincidencias
1	840	B	D	B	Electre y RN Todos
2	860	A	A	A	
3	888	C	D	A	
4	900	B	E	D	
5	833	E	C	E	Electre y RN RN y AHP
6	812	A	D	D	
7	876	D	C	B	Electre y AHP Electre y AHP
8	898	E	E	B	
9	811	A	A	E	
10	815	C	D	E	
11	809	C	E	B	Todos
12	800	E	E	E	
13	803	A	E	D	
14	866	C	C	D	Electre y AHP
15	897	E	B	C	
16	843	C	D	C	Electre y RN
17	823	E	D	B	
18	855	C	C	E	Electre y AHP Electre y AHP
19	865	B	B	E	
20	851	A	B	B	RN y AHP
21	812	B	A	E	
22	804	B	D	B	Electre y RN
23	818	B	E	C	
24	820	E	E	D	Electre y AHP
25	886	A	C	B	
26	890	D	D	D	Todos
27	839	E	A	C	
28	807	B	B	E	Electre y AHP Todos
29	821	C	C	C	
30	861	D	D	E	Electre y AHP

Los mismos datos de la tabla, pero en formato gráfico, se muestran seguidamente.

Figura 71: Alternativa elegida por cada método a lo largo del banco de pruebas

Agrupados por porcentaje se muestra en la siguiente gráfica la cantidad de coincidencias entre los tres métodos:

Figura 72: Porcentaje de coincidencias de alternativa elegida por cada método

Analizando los datos, destaca el alto porcentaje de veces que coincide el resultado de la aplicación de ELECTRE y de AHP. Esto puede tener una explicación normal, dado que ambos métodos son muy parecidos en su mecanismo interno, y también están usando una distribución de pesos sobre los criterios prácticamente equivalente.

En cambio, las coincidencias de resultado entre ELECTRE o AHP con el resultado de aplicar el método basado en Redes Neuronales opción A, evidentemente no responden a similitudes en el funcionamiento interno, dado que no poseen ninguna. Dado que el resultado de la Red Neuronal se debe a su periodo de entrenamiento podemos deducir que en estos casos quizá la red haya sido entrenada con patrones parecidos a los resultados producidos por la aplicación de ELECTRE o AHP.

También es una cantidad importante las veces que los tres métodos producen la misma solución, cosa que se debe, como ya hemos dicho al principio al reducido número de alternativas. Incluso si hubieran sido alternativas escogidas de forma completamente aleatoria siempre existiría la posibilidad de la coincidencia de la elección.

Por ahora lo único que hemos analizado es la coincidencia o no de las soluciones encontradas por estos tres métodos, pero no hemos analizado si, más allá de la coincidencia, unos resultados son mejores que otros. Para responder a esta cuestión, en el siguiente apartado se calcula el *ranking* de todas las alternativas, de las cuales las discretas son sólo una parte.

6.3. Comparativa por criterios aislados

Como base para poder comparar el resultado de los diferentes métodos y algoritmos, vamos a plantear la utilización de los cinco criterios que hemos definido en el inicio de este trabajo, y que son la parte fundamental del problema multicriterio que hemos planteado:

- Coste material de ejecutar la reparación. Incluye coste de desplazamientos, coste material de la instalación de nuevos cableados, soldaduras/empalmes, etc. Se mide en unidades monetarias (u.m.).
- Coste humano de ejecutar la reparación. Depende de la cantidad de personas involucradas, su sueldo y el tiempo que dediquen a la tarea. Se mide en unidades monetarias (u.m.).
- Penalizaciones: coste directo de las penalizaciones por incumplimiento de la calidad de servicio contratada por los clientes afectados. Como ya se comentado antes, el incumplimiento de la calidad de servicio por superación de un tiempo máximo de indisponibilidad del servicio genera una penalización. Las penalizaciones consisten en rebajas en el precio de las facturas que se cobran a los clientes, o incluso en regalos de periodos de tiempo de alquiler gratuitos. Se mide en unidades monetarias (u.m.).
- Cese de ingresos por los clientes descontentos que rescinden su contrato y se cambian de operadora. Se mide en unidades monetarias por mes (u.m./mes).
- Repercusión mediática, ante grandes cortes de servicio en hospitales, aeropuertos, etc. Publicidad negativa y como consecuencia, disminución de la incorporación de nuevos clientes, que se dirigirán a otras operadoras. Se mide en unidades de tiempo (minutos) refiriéndose al tiempo de incomunicación acumulado de todos los circuitos cuyo corte tiene una gran repercusión mediática.

Recordemos que todos los criterios son del tipo “más es peor”, es decir, cuanto mayor sea el valor de la magnitud del criterio peor es la alternativa elegida que provoca ese valor. Básicamente esto ocurre porque todas las magnitudes de los criterios son costes para la empresa.

En primer lugar se van a evaluar los criterios por separado. Para cada uno de los criterios anteriores, para cada uno de los conjuntos de entidades cortadas, y para cada uno de los algoritmos utilizados en este trabajo, se calcularán los valores obtenidos de cada uno de esos criterios de manera independiente. Las fórmulas de cálculo son las descritas en el planteamiento inicial del problema multicriterio.

Las alternativas que vamos a comparar son todos los métodos de ordenación propuestos en el presente trabajo, pero con algunas particularidades, para poder hacerlos comparables en la mayor igualdad de condiciones posible. Las alternativas son estas:

- **Aleatorio.** Se trata de una ordenación de entidades obtenida de forma totalmente aleatoria. La ventaja principal que tiene es que el tiempo de generación es prácticamente inmediato. Esta alternativa servirá para comparar si efectivamente todo el resto de métodos propuestos suponen una mejora efectiva con respecto a no gastar tiempo en aplicar ninguno de ellos y tomar la lista de circuitos inicial “desordenada” como punto de partida para los trabajos de reparación.
- **ELECTRE I.** Es el método ya estudiado que trabaja con cinco alternativas de ordenación predefinidas.
- **AHP.** Trabaja con las mismas cinco alternativas, y unos pesos de los criterios prácticamente iguales que los de ELECTRE.
- **Red Neuronal opción A.** Trabaja con las mismas cinco alternativas. Entre las opciones planteadas, se usa la red con una capacidad de nodos de entrada para 20 circuitos. Se ejecuta con una implementación “en serie”, para procesar secuencialmente las sucesivas ejecuciones que se necesiten hasta barrer todos los circuitos de entrada. De esta manera puede compararse en carga computacional con las anteriores alternativas, las cuales no soportan implementaciones de ejecución de tareas “en paralelo”.
- **Red Neuronal opción B.** Por su propio planteamiento no trabaja con alternativas de ordenación predefinidas. Proporciona como salida un orden completo de entidades, que puede ser cualquiera. Para poder compararla en igualdad de condiciones, también se utiliza la que tiene una capacidad de nodos de entrada para 20 circuitos, y también con una implementación en serie de las sucesivas ejecuciones necesarias.
- **PSO.** Este método tampoco trabaja con alternativas de ordenación predefinidas y tiene la libertad de producir cualquier ordenación como resultado. Como parámetros del método se han elegido los valores $\alpha=8$; $\beta=0,6$; $\gamma=1,2$, que constituyen un compromiso entre una buena libertad de exploración, y un tiempo de ejecución no demasiado excesivo hasta alcanzar una posible convergencia). Como límite de seguridad en la cantidad de tiempo de computación empleado se ha impuesto 120 minutos, si es que antes el algoritmo no logra encontrar una solución estable. Es decir, la condición de parada es lo que primero se alcance: o una solución estable o 120 minutos de ejecución. Esta es la alternativa que más tiempo de computación consumirá entre todas, dado que el algoritmo se mantiene explorando hasta que alcanza la condición de parada.
- **PSO limitado.** Se trata del mismo algoritmo que la alternativa anterior pero más limitado en el tiempo máximo de ejecución. Únicamente se permiten como máximo 45 iteraciones, lo cual con los factores de velocidad escogidos supone unos tiempos de ejecución de unos 1000 segundos (o sea, entre 15 y 20 minutos). De esta manera este algoritmo PSO se puede comparar en igualdad de condiciones con el resto de algoritmos (con un tiempo de ejecución comparable).

Veamos a continuación el *ranking* particular por cada criterio.

Coste Material

Valor de la magnitud del Criterio de Coste Material, para cada alternativa, para cada uno de los 30 conjuntos de prueba (30 cortes de red):

Figura 73: Comparativa por criterio de Coste Material

Vemos que claramente la ordenación aleatoria es la que proporciona peores valores de Coste Material (valores más altos), llegando hasta casi 1200 um.

Mientras, la ordenación producida por el método PSO es la que da mejores resultados. En el peor de los casos, nunca llega al valor de 500 um, para ningún corte de red.

La versión limitada de PSO es el segundo mejor método (tras la versión “ilimitada”). Lo cual ya va anticipando el resultado final global que se podrá ver en los siguientes apartados.

Coste Humano

Valor de la magnitud del Criterio de Coste Humano, para cada alternativa, para cada uno de los 30 conjuntos de prueba (30 cortes de red):

Figura 74: Comparativa por criterio de Coste Humano

De nuevo, la ordenación producida por el método PSO es la que proporciona mejores resultados (menores valores). Aunque no es infalible, en algunos conjuntos de prueba ha sido superadas por otras.

Penalizaciones

Valor de la magnitud del Criterio de Penalizaciones, para cada alternativa, para cada uno de los 30 conjuntos de prueba (30 cortes de red):

Figura 75: Comparativa por criterio de Penalizaciones

Esta siendo habitual en todas las gráficas que hemos visto hasta ahora, que de abajo a arriba siempre aparece primero el método PSO, y después el PSO limitado, siendo en media mejores que todos los demás.

La ordenaciones producto del resto de métodos producen valores que se sitúan en la banda central de la gráfica.

Cese Ingresos

Valor de la magnitud del Criterio de Cese de Ingresos, para cada alternativa, para cada uno de los 30 conjuntos de prueba (30 cortes de red):

Figura 76: Comparativa por criterio de Cese de Ingresos

Este criterio es el que produce los valores de mayor magnitud entre todos, siendo de varios miles casi todos ellos. El hecho de que sea un valor tan alto comparado con el resto realmente no influye en nada, simplemente responde a las fórmulas que intervienen en su cálculo. Fórmulas que han sido establecidas por los analistas que han realizado el planteamiento del problema (en este caso particular, establecidas por el autor del presente documento).

Repercusión

Valor de la magnitud del Criterio de Repercusión Mediática, para cada alternativa, para cada uno de los 30 conjuntos de prueba (30 cortes de red). Al contrario que el resto de criterios, este no se mide en coste, sino que se mide en minutos de incomunicación acumulados por todas las entidades cortadas:

Figura 77: Comparativa por criterio de Repercusión Mediática

En este caso vemos que la ordenación aleatoria produce valores mucho mayores que el resto de ordenaciones. Ello es debido a que un mal ordenamiento influye mucho en el criterio de la repercusión mediática.

6.4. Comparativa conjunta. Aplicación de PROMETHEE

Además de mostrar una análisis por criterios, de manera independiente, es necesario aportar una visión conjunta, una visión combinada de todos los criterios. Y para ello, qué mejor manera que utilizar otro método multicriterio discreto. Para este caso hemos elegido el método PROMETHEE. Lo que haremos será, ante la misma lista de circuitos afectados, que es la entrada del problema, aplicar todos los algoritmos, obtener la lista ordenada de circuitos que produce cada algoritmo, y cada una de estas listas será una de las “alternativas” de entrada para una ejecución de un método PROMETHEE. Dicho método, obviamente utilizará los mismos “criterios” que los que se han ido aplicando durante todo el trabajo y con una ponderación entre ellos que también sea equivalente a la ya utilizada (para, de esta manera, realizar una comparación acorde al resto de simulaciones ya realizadas).

6.4.1. Establecimiento de umbrales de preferencia por cada criterio

En primer lugar hay que modelar las preferencias relativas a cada uno de los cinco criterios utilizados. Esta fase requiere que a cada criterio se le asocie una función mediante la cual se valora la preferencia de una alternativa con respecto a otra. De los seis tipos de funciones disponibles (Usual, Linear, Level, U-Shape, V-Shape y Gaussian) se ha decidido utilizar la V-Shape dada la distribución de los valores que hemos encontrado y dado que los valores representan un valor en dinero o en tiempo.

En definitiva, para asignar las funciones a los criterios se consideran las medias y desviaciones estándar de los datos recogidos, pero también la aplicación del sentido común y la experiencia del analista.

Coste Material

Las medias de valores obtenidos, para cada alternativa, sobre los 30 conjuntos de prueba son:

Figura 78: Medias del criterio de Coste Material

Se han decidido establecer lo siguientes umbrales:

- Indiferencia por encima de 800 um.
- Preferencia débil, entre 800 y 700.
- Preferencia estricta por debajo de 700 um.

Coste Humano

Las medias de valores obtenidos, para cada alternativa, sobre los 30 conjuntos de prueba son:

Figura 79: Medias del criterio de Coste Humano

Se han decidido establecer lo siguientes umbrales:

- Indiferencia por encima de 2000 um.
- Preferencia débil, entre 2000 y 1800.
- Preferencia estricta por debajo de 1800 um.

Penalizaciones

Las medias de valores obtenidos, para cada alternativa, sobre los 30 conjuntos de prueba son:

Figura 80: Medias del criterio de Penalizaciones

Se han decidido establecer lo siguientes umbrales:

- Indiferencia por encima de 1100 um.
- Preferencia débil, entre 1100 y 1000.
- Preferencia estricta por debajo de 1000 um.

Cese Ingresos

Las medias de valores obtenidos, para cada alternativa, sobre los 30 conjuntos de prueba son:

Figura 81: Medias del criterio de Cese de Ingresos

Se han decidido establecer lo siguientes umbrales:

- Indiferencia por encima de 3600 um.
- Preferencia débil, entre 3600 y 3200.
- Preferencia estricta por debajo de 3200 um.

Repercusión

Las medias de valores obtenidos, para cada alternativa, sobre los 30 conjuntos de prueba son (medidas en minutos):

Figura 82: Medias del criterio de Repercusión Mediática

Se han decidido establecer lo siguientes umbrales:

- Indiferencia por encima de 80 min.
- Preferencia débil, entre 80 y 60.
- Preferencia estricta por debajo de 60 min.

6.4.2. Pesos de los criterios

Para la asignación de los pesos relativos de los criterios se utilizará el planteamiento ya realizado en el capítulo de la aplicación del método AHP. Es decir, los siguientes valores:

	Coste material	Coste humano	Penalizaciones	Cese de ingresos	Repercusión mediática
Pesos	0,15	0,17	0,11	0,23	0,34
MinMax	Minimizar	Minimizar	Minimizar	Minimizar	Minimizar

6.4.3. Valores de los flujos obtenidos

Con todos los datos de entrada que se han ido exponiendo dentro de este capítulo es el momento ahora de aplicar el cálculo de flujos de entrada (σ^+), flujos de salida (σ^-), y flujos netos ($\sigma = \sigma^+ - \sigma^-$),

del método PROMETHEE II, sobre cada una de los conjuntos de casos de prueba y sobre cada una de las alternativas planteadas:

- Aleatorio.
- ELECTRE I.
- AHP.
- Red Neuronal opción A.
- Red Neuronal opción B.
- PSO.
- PSO limitado.

Los datos obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Identificador de conjunto	Cantidad Entidades	Valores de flujos	Aleatorio	Electre I	AHP	RN A	RN B	PSO limitado	PSO
1	840	ø+ (de salida)	0,01	0,39	0,79	0,39	0,1	0,5	0,84
		ø- (de entrada)	0,86	0,39	0,17	0,39	0,58	0,15	0,17
		ø (neto)	-0,85	0	0,62	0	-0,48	0,35	0,67
2	860	ø+ (de salida)	0,03	0,47	0,47	0,47	0,76	0,44	0,85
		ø- (de entrada)	0,88	0,46	0,46	0,46	0,33	0,22	0,17
		ø (neto)	-0,85	0,01	0,01	0,01	0,43	0,22	0,68
3	888	ø+ (de salida)	0,05	0,69	0,74	0,26	0,1	0,08	0,84
		ø- (de entrada)	0,93	0,33	0,12	0,07	0,35	0,48	0,14
		ø (neto)	-0,88	0,36	0,62	0,19	-0,25	-0,4	0,7
4	900	ø+ (de salida)	0,05	0,24	0,83	0,2	0,66	0,32	0,79
		ø- (de entrada)	0,91	0,44	0,12	0,56	0,41	0,15	0,19
		ø (neto)	-0,86	-0,2	0,71	-0,36	0,25	0,17	0,6
5	833	ø+ (de salida)	0,04	0,41	0,69	0,41	0,19	0,8	0,85
		ø- (de entrada)	0,92	0,39	0,46	0,39	0,27	0,34	0,12
		ø (neto)	-0,88	0,02	0,23	0,02	-0,08	0,46	0,73
6	812	ø+ (de salida)	0,03	0,22	0,68	0,68	0,18	0,3	0,84
		ø- (de entrada)	0,86	0,44	0,21	0,21	0,55	0,25	0,1
		ø (neto)	-0,83	-0,22	0,47	0,47	-0,37	0,05	0,74
7	876	ø+ (de salida)	0,06	0,77	0,56	0,21	0,1	0,15	0,82
		ø- (de entrada)	0,91	0,27	0,33	0,1	0,55	0,31	0,17
		ø (neto)	-0,85	0,5	0,23	0,11	-0,45	-0,16	0,65
8	898	ø+ (de salida)	0,04	0,67	0,67	0,18	0,24	0,75	0,78
		ø- (de entrada)	0,96	0,31	0,31	0,57	0,38	0,13	0,12
		ø (neto)	-0,92	0,36	0,36	-0,39	-0,14	0,62	0,66
9	811	ø+ (de salida)	0,06	0,28	0,28	0,67	0,3	0,68	0,79
		ø- (de entrada)	0,82	0,38	0,38	0,07	0,25	0,47	0,04
		ø (neto)	-0,76	-0,1	-0,1	0,6	0,05	0,21	0,75
10	815	ø+ (de salida)	0,02	0,8	0,09	0,11	0,28	0,54	0,71
		ø- (de entrada)	0,94	0,14	0,39	0,19	0,12	0,2	0,12
		ø (neto)	-0,92	0,66	-0,3	-0,08	0,16	0,34	0,59
11	809	ø+ (de salida)	0,02	0,5	0,28	0,37	0,06	0,72	0,79
		ø- (de entrada)	0,82	0,13	0,35	0,33	0,4	0,21	0,06
		ø (neto)	-0,8	0,37	-0,07	0,04	-0,34	0,51	0,73

ALGORITMOS DE DECISIÓN PARA PRIORIZAR LAS ACCIONES DE RESTAURACIÓN EN EL MANTENIMIENTO DE REDES

12	800	ø+ (de salida)	0,01	0,44	0,44	0,44	0,83	0,18	0,69
		ø- (de entrada)	0,89	0,18	0,18	0,18	0,15	0,59	0,2
		ø (neto)	-0,88	0,26	0,26	0,26	0,68	-0,41	0,49
13	803	ø+ (de salida)	0,02	0,77	0,25	0,57	0,08	0,29	0,77
		ø- (de entrada)	0,84	0,25	0,32	0,2	0,4	0,18	0,05
		ø (neto)	-0,82	0,52	-0,07	0,37	-0,32	0,11	0,72
14	866	ø+ (de salida)	0,01	0,59	0,59	0,79	0,11	0,15	0,84
		ø- (de entrada)	0,93	0,24	0,24	0,29	0,22	0,48	0,17
		ø (neto)	-0,92	0,35	0,35	0,5	-0,11	-0,33	0,67
15	897	ø+ (de salida)	0,03	0,45	0,46	0,13	0,29	0,72	0,8
		ø- (de entrada)	0,94	0,24	0,27	0,52	0,51	0,17	0,06
		ø (neto)	-0,91	0,21	0,19	-0,39	-0,22	0,55	0,74
16	843	ø+ (de salida)	0,06	0,44	0,79	0,44	0,11	0,13	0,78
		ø- (de entrada)	0,86	0,05	0,34	0,05	0,54	0,22	0,03
		ø (neto)	-0,8	0,39	0,45	0,39	-0,43	-0,09	0,75
17	823	ø+ (de salida)	0,01	0,7	0,2	0,18	0,5	0,4	0,83
		ø- (de entrada)	0,95	0,08	0,49	0,39	0,52	0,08	0,1
		ø (neto)	-0,94	0,62	-0,29	-0,21	-0,02	0,32	0,73
18	855	ø+ (de salida)	0,03	0,28	0,28	0,78	0,42	0,43	0,73
		ø- (de entrada)	0,97	0,41	0,41	0,03	0,16	0,36	0,12
		ø (neto)	-0,94	-0,13	-0,13	0,75	0,26	0,07	0,61
19	865	ø+ (de salida)	0,04	0,3	0,3	0,87	0,42	0,06	0,77
		ø- (de entrada)	0,92	0,32	0,32	0,21	0,09	0,45	0,37
		ø (neto)	-0,88	-0,02	-0,02	0,66	0,33	-0,39	0,4
20	851	ø+ (de salida)	0,02	0,06	0,41	0,41	0,64	0,75	0,81
		ø- (de entrada)	0,9	0,55	0,45	0,45	0,39	0,18	0,15
		ø (neto)	-0,88	-0,49	-0,04	-0,04	0,25	0,57	0,66
21	812	ø+ (de salida)	0,02	0,62	0,24	0,08	0,34	0,7	0,87
		ø- (de entrada)	0,96	0,3	0,35	0,53	0,19	0,17	0,19
		ø (neto)	-0,94	0,32	-0,11	-0,45	0,15	0,53	0,68
22	804	ø+ (de salida)	0,05	0,39	0,81	0,39	0,12	0,67	0,73
		ø- (de entrada)	0,93	0,4	0,12	0,4	0,57	0,34	0,24
		ø (neto)	-0,88	-0,01	0,69	-0,01	-0,45	0,33	0,49
23	818	ø+ (de salida)	0,06	0,4	0,24	0,22	0,07	0,71	0,8
		ø- (de entrada)	0,91	0,09	0,31	0,17	0,55	0,2	0,08
		ø (neto)	-0,85	0,31	-0,07	0,05	-0,48	0,51	0,72
24	820	ø+ (de salida)	0,04	0,48	0,48	0,2	0,21	0,8	0,79
		ø- (de entrada)	0,81	0,23	0,23	0,49	0,41	0,38	0,06
		ø (neto)	-0,77	0,25	0,25	-0,29	-0,2	0,42	0,73
25	886	ø+ (de salida)	0,05	0,11	0,63	0,25	0,76	0,23	0,86
		ø- (de entrada)	0,89	0,45	0,25	0,19	0,13	0,47	0,19
		ø (neto)	-0,84	-0,34	0,38	0,06	0,63	-0,24	0,67
26	890	ø+ (de salida)	0,02	0,47	0,47	0,47	0,12	0,74	0,84
		ø- (de entrada)	0,86	0,18	0,18	0,18	0,62	0,21	0,15
		ø (neto)	-0,84	0,29	0,29	0,29	-0,5	0,53	0,69
27	839	ø+ (de salida)	0,05	0,71	0,2	0,51	0,35	0,13	0,85
		ø- (de entrada)	0,95	0,3	0,28	0,31	0,26	0,41	0,13
		ø (neto)	-0,9	0,41	-0,08	0,2	0,09	-0,28	0,72
28	807	ø+ (de salida)	0,02	0,21	0,21	0,86	0,57	0,18	0,79
		ø- (de entrada)	0,87	0,03	0,03	0,11	0,32	0,68	0,3

COMPARATIVA DE RESULTADOS DE LOS ALGORITMOS USADOS

		$\emptyset$ (neto)	-0,85	0,18	0,18	0,75	0,25	-0,5	0,49
29	821	$\emptyset+$ (de salida)	0,01	0,51	0,51	0,51	0,71	0,14	0,87
		$\emptyset-$ (de entrada)	0,89	0,16	0,16	0,16	0,31	0,58	0,12
		$\emptyset$ (neto)	-0,88	0,35	0,35	0,35	0,4	-0,44	0,75
30	861	$\emptyset+$ (de salida)	0,06	0,35	0,35	0,43	0,2	0,71	0,86
		$\emptyset-$ (de entrada)	0,84	0,34	0,34	0,21	0,62	0,22	0,19
		$\emptyset$ (neto)	-0,78	0,01	0,01	0,22	-0,42	0,49	0,67

En la tabla se han marcado en fondo sombreado las celdas correspondientes a las alternativas discretas en los casos en los que se ha producido alguna coincidencia en la alternativa elegida (coincidencia de los alternativas elegidas por dos métodos o por los tres a la vez). Las celdas sombreadas tienen los mismos valores de flujo, porque realmente representan a la misma alternativa.

Por filas se agrupan los resultados correspondientes a cada conjunto de entidades de prueba. El valor que ordena de mejor a peor las alternativas es el valor del flujo neto ($\emptyset$), que es el dato último de salida que produce el algoritmo PROMETHEE II. Las celdas sombreadas tienen los mismos valores de flujo, porque realmente representan a la misma alternativa.

Por ejemplo, si nos fijamos en el primer conjunto, el conjunto 1, los valores de los flujos netos han sido

- Aleatorio: -0,85
- ELECTRE I: 0
- AHP: 0,62
- Red Neuronal opción A: 0 (igual que el ELECTRE I porque están usando la misma ordenación en este caso)
- Red Neuronal opción B: -0,48
- PSO: 0,35
- PSO limitado: 0,67.

Eso quiere decir, que el orden de mejor a peor, de todos los métodos , para el conjunto 1, ha sido: PSO, AHP, PSO limitado, ELECTRE = Red Neuronal A, Red Neuronal B y Aleatorio.

Vamos a traducir la matriz de flujos netos a una matriz más sencilla de entender, que en lugar de valores de flujo tenga el valor del *ranking* (de 1 a 7) de cada alternativa, en cada conjunto de datos de prueba:

Id. de conjunto	Aleatorio	Electre I	AHP	Red Neuronal A	Red Neuronal B	PSO limitado	PSO
1	7	4	2	4	6	3	1
2	7	4	4	4	2	3	1
3	7	3	2	4	5	6	1
4	7	5	1	6	3	4	2
5	7	4	3	4	5	2	1
6	7	5	2	2	6	4	1
7	7	2	3	4	6	5	1

8	7	3	3	6	5	2	1
9	7	5	5	2	4	3	1
10	7	1	6	5	4	3	2
11	7	3	5	4	6	2	1
12	7	3	3	3	1	6	2
13	7	2	5	3	6	4	1
14	7	3	3	2	5	6	1
15	7	3	4	6	5	2	1
16	7	3	2	3	6	5	1
17	7	2	6	5	4	3	1
18	7	5	5	1	3	4	2
19	7	4	4	1	3	6	2
20	7	6	4	4	3	2	1
21	7	3	5	6	4	2	1
22	7	4	1	4	6	3	2
23	7	3	5	4	6	2	1
24	7	3	3	6	5	2	1
25	7	6	3	4	2	5	1
26	7	3	3	3	6	2	1
27	7	2	5	3	4	6	1
28	7	4	4	1	3	6	2
29	7	3	3	3	2	6	1
30	7	4	4	3	6	2	1

En la tabla, un valor 1 (marcado en verde) significa que esa alternativa ha sido la mejor, y un valor 7 significa que ha sido la peor de todas las alternativas.

6.4.4. Resultados finales de la comparación de los métodos

Con los datos anteriores a la vista, ahora sí estamos en disposición de determinar cuál es el mejor método de ordenación entre todos los que se han utilizado. Para ello realicemos un rápido análisis estadístico.

Tras la ejecución de los 30 conjuntos de prueba (30 cortes de red), claramente el método PSO “ilimitado” es el que más veces ha quedado el primero del *ranking*, tal y como se muestra a continuación:

Figura 83: Cantidad de veces que cada algoritmo fue el mejor

Sólo unas pocas veces el resto de algoritmos han logrado quedar delante de PSO. El Aleatorio no ha sido ninguno de ellos (la ordenación aleatoria nunca ha sido la mejor, ni siquiera por casualidad).

El algoritmo PSO limitado a 45 iteraciones tampoco ha quedado primero nunca en esta comparativa. Cosa que tiene sentido porque no normalmente al aumentar las iteraciones del PSO siempre irá aumentando la probabilidad de encontrar una solución mejor. Por eso es incompatible que el PSO limitado se mejor que el PSO “ilimitado”.

Esta comparativa, que da como ganador imbatible al algoritmo PSO, esconde un matiz que hace que no sea una victoria tan abrumante: el algoritmo PSO necesita mucho mayor tiempo de ejecución de todos los demás. O dicho de otro modo, gracias a disponer de un mayor tiempo de búsqueda, el algoritmo PSO es capaz de encontrar mejores soluciones que el resto. Conclusión que parece evidente, por cierto. El resto de algoritmos no se ven favorecidos de disponer de mayor tiempo de computación porque no están diseñados para seguir explorando soluciones.

Si mostramos los tiempos de ejecución comparados obtenemos la siguiente gráfica:

Figura 84: Tiempos medios de ejecución de cada algoritmo

Aquí se muestran los tiempos medios de ejecución, de cada alternativa, para obtener una solución ante cada conjunto de circuitos de entrada (una solución es una ordenación de los circuitos). La media se ha realizado sobre los 30 conjuntos de circuitos de prueba. El tiempo se mide en minutos.

A primera vista se ve cierta proporcionalidad entre la cantidad de veces que el algoritmo PSO es mejor que el resto, y la cantidad de veces que el tiempo de ejecución necesitado por PSO es mayor que el resto. Es decir, podríamos correlar que cuánto más tiempo de ejecución se le brinda a PSO, con respecto al resto de algoritmos, en la misma proporción aumenta la calidad de la solución encontrada.

Para poder realizar una comparación en igualdad de condiciones eliminemos al algoritmo PSO de la comparativa, y veamos como queda la frecuencia de veces en las que cada uno del resto de algoritmos ha sido el mejor, y los tiempos medios de ejecución (en minutos) ante cada conjunto de prueba.

Figura 85: Comparativa entre todos los algoritmos, salvo PSO

Seguimos viendo que el algoritmo PSO limitado a 45 iteraciones ha sido más veces el mejor, casi el doble de veces que el siguiente. El resto de algoritmos están más o menos empatados en cuanto a la cantidad de veces que han quedado primeros en el *ranking*.

Y en este caso, si nos fijamos en los tiempos de ejecución, aunque el del PSO limitado es algo mayor que el resto, ahora sí que los tiempos de todos los algoritmos son comparables. Por lo que podemos concluir que **el algoritmo PSO demuestra ser el idóneo** en el entorno del problema que pretendemos resolver.

Por último, simplemente para completar las comparativas que estamos realizando, acometamos ahora una análisis únicamente de los algoritmos que producen como resultado un conjunto de alternativas discretas de ordenación. Esto es, el algoritmo ELECTRE I, AHP y la Red Neuronal opción A. Por tanto, eliminemos de la gráfica anterior los datos de PSO limitado y de la Red Neuronal opción B.

Tras la ejecución de los 30 conjuntos de entidades de prueba (30 cortes), la cantidad de veces que cada algoritmo de alternativas discretas ha sido el mejor (según los resultados del método PROMETHEE II) se muestra en la siguiente gráfica:

Figura 86: Comparativa entre Alternativas discretas

Como ya se expuso al principio de este capítulo, muchas veces estas tres alternativas producen la misma solución. Por eso a veces han sido varios algoritmos a la vez los que han quedado en primer lugar. Evidentemente las pocas veces que los tres algoritmos han coincidido entre sí, la única solución obtenida ha sido a la vez la mejor.

7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

¿Por dónde comienzo? Este es un típico problema de decisión que me asalta todas las mañanas, cuando llego a mi puesto de trabajo en mi oficina, y me encuentro con un montón de tareas que tengo pendientes de realizar. Yo soy uno sólo y únicamente puedo ir acabando mis tareas de una en una, en una determinada secuencia. Lo ideal sería disponer de una forma fácil y rápida para poder elegir la tarea correcta, de forma que mi trabajo del día produjese un resultado óptimo. Ahora bien, mis responsables deben estar convencidos de que ese algoritmo de elección es el correcto, porque de lo contrario serán ellos los que me impongan las prioridades, usando su propio criterio. Por tanto el algoritmo no sólo debe ser bueno, desde el punto de vista de que analice y tenga en cuenta correctamente todos los datos de entrada y produzca una ordenación óptima de tareas, sino que debe ser convincente, es decir, debe convencer de que es bueno a las personas que toman las decisiones sobre mí y que evalúan el resultado de mi trabajo.

Este ejemplo es muy similar al objeto del presente trabajo, salvo que en lugar de priorizar mis tareas diarias, de lo que se trata es de priorizar las acciones de mantenimiento sobre una red de una operadora de telecomunicaciones.

Una de las partes principales de este trabajo ha sido el correcto planteamiento del problema y de los datos de partida. Es en este punto donde fracasan muchos desarrollos informáticos. Es muy fácil identificar el problema general que se quiere resolver, pero lo que no es tan fácil es plantear correctamente los requisitos del desarrollo, con el suficiente nivel de detalle necesario para llevar a cabo su implementación. Se necesita contar con expertos que conozcan muy bien el entorno del problema para que la tarea del planteamiento se pueda realizar con éxito.

En segundo lugar, los algoritmos teóricos necesitan datos para funcionar, y la utilización de datos reales es lo que verdaderamente demuestra su validez. Dada mi larga experiencia trabajando en grandes operadoras de telecomunicación, he podido tener acceso a datos de planta reales, los cuales han servido para alimentar los algoritmos planteados. Para no vulnerar ninguna ley de confidencialidad de datos, toda esta información ha sido convenientemente tratada, de manera previa, para ocultar los valores reales de los mismos. Este ha sido un proceso consistente en la inclusión de ciertos valores aleatorios, y el reemplazo de ciertos valores reales por valores inventados (sobre todo en lo relativo a los nombres de los clientes).

7.1. Una decisión, múltiples opciones

Siempre es así: ante un problema de decisión se presentan varias opciones para elegir. Si por unas razones o por otras sólo existiera una opción, decidir no sería realmente un problema.

Y precisamente eso es lo que ocurre muchas veces. Uno puede creer que ante una decisión existen varias opciones, pero al analizar detalladamente todo el entorno del problema puede resultar que sólo existe una opción. Muchas pueden ser las restricciones, inicialmente ocultas, que afecten a un cierto problema de decisión.

En el entorno empresarial, en el que nos movemos habitualmente en nuestra vida profesional, muchas veces encontraremos estudios técnicos detallados, estudios de viabilidad, análisis detallados de situaciones, simulaciones técnicas, análisis de impacto, casos de negocio, y otros múltiples ejemplos de documentos que se elaboran para tomar una decisión. Todo ellos intentan justificar,

cuantificar o medir, con datos supuestamente objetivos, las ventajas o inconvenientes de las diferentes alternativas que existan. Sin embargo, lamentablemente, muchas veces toda esa documentación no sirve de nada.

Seguro que todos conocemos situaciones en las que claramente una solución o alternativa no es nada recomendable, desde el punto de vista de los expertos técnicos, pero finalmente alguien con un poder de decisión superior acepta dicha alternativa. Podríamos estar hablando de decidir si el trazado de una autovía o de una línea férrea debe pasar por una cierta región, o al contrario, si debe evitar la expropiación de unos terrenos a una cierta persona, o de decidir si se implanta un nuevo sistema o producto informático en una empresa, o de decidir qué estatua se coloca en una rotonda, los ejemplos son múltiples y variados.

En mi experiencia particular conozco especialmente dos casos, de primera mano, en los que se tomó la decisión de sustituir un gran sistema informático (con varios años de antigüedad, pero funcionando a pleno rendimiento y sin apenas errores) por otro sistema, nuevo, basado en las últimas tecnologías, que prometía ser mucho más ventajoso que el existente. Y la realidad en ambos casos es que esa promesa no se hizo realidad. Fueron proyectos que implicaron el desembolso de decenas de millones de euros para la compañía, y el resultado final fue un gran trabajo de integración con los sistemas existentes, y una funcionalidad global conjunta, menor que la que se tenía con los sistemas antiguos. Las personas que tenían el poder de tomar la decisión desoyeron todos los consejos, todos los informes, o tal vez, no desoyeron nada, sino que simplemente la decisión ya estaba tomada y respondía a intereses de otro tipo, nada técnicos. Quizá intereses personales entre los directores de ambas empresas (la que compraba el sistema y la de los proveedores de la nueva solución), quizá intereses políticos entre las compañías, o quizá intereses de un nivel superior, hablaríamos de compromisos entre los grandes *holdings* mundiales de empresas o incluso entre países. Nunca sabremos hasta qué punto el poder de las decisiones a nivel mundial se concentra en unas pocas manos.

No olvidemos tampoco que, por ahora, las grandes decisiones las toman personas humanas, y por tanto están sujetas a cierta aleatoriedad, o incluso impulsividad.

7.2. Explicación de los resultados obtenidos y sus limitaciones

Dejando aparte las discusiones filosóficas sobre lo que realmente impulsa una cierta decisión humana, y bajando al detalle de la problemática concreta en la que se enfoca el presente trabajo, lo que se persigue es la elaboración de un algoritmo que ordene de mayor a menor prioridad todos los circuitos y caminos cuyo servicio esté afectado en un momento dado por un corte en una red de telecomunicaciones. En función de esa prioridad los trabajadores del departamento de mantenimiento de la operadora realizarán las acciones oportunas para ir recuperando cada una de esas entidades afectadas.

Puesto que los cortes se producen en la red en momentos aleatorios del día, el algoritmo deberá ser ejecutado, con una cierta periodicidad, para obtener nuevas ordenaciones que tengan en cuenta los nuevos circuitos que se hayan podido ver afectados por un corte. El objetivo global que debe conseguir el algoritmo de priorización es escoger la mejor alternativa de ordenación que minimiza todos los costes identificados.

Las opciones que se han utilizado para tratar de solucionar el problema de ordenación propuesto han sido:

- **Aleatorio.** Se trata de una ordenación de entidades obtenida de forma totalmente aleatoria. Esta alternativa ha servido simplemente para comparar si todo el resto de métodos propuestos suponen una mejora efectiva con respecto a no realizar ninguna ordenación en absoluto.
- **ELECTRE I.** Método multicriterio discreto aplicado sobre cinco alternativas de ordenación predefinidas.
- **AHP.** Es otro método multicriterio que ha sido ejecutado con las mismas cinco alternativas, y unos pesos de los criterios similares a los de ELECTRE.
- **Red Neuronal opción A.** Algoritmo basado en el paradigma de las redes neuronales en el que la salida de la red es una de las mismas cinco alternativas de ordenación, utilizadas en ELECTRE I y AHP.
- **Red Neuronal opción B.** Algoritmo basado también en redes neuronales, pero que no trabaja con alternativas de ordenación predefinidas, sino que proporciona como salida un orden completo de entidades, que puede ser cualquiera.
- **PSO.** Método basado en la Optimización por Enjambre de Partículas, adaptado a un problema de permutación de enteros (ordenación). Este método tampoco trabaja con alternativas de ordenación predefinidas y tiene la libertad de producir cualquier ordenación como resultado.
- **PSO limitado.** Se trata del mismo algoritmo que la alternativa anterior pero más limitado en el tiempo máximo de ejecución. Únicamente se permiten como máximo 45 iteraciones, con el objetivo de que se obtenga un resultado en un tiempo razonablemente corto.

Podríamos haber utilizado otros algoritmos, quizá algunos más adecuados que estos. La utilización de estos algoritmos elegidos responde, en parte, a un objetivo didáctico. El autor de este trabajo ha pretendido barrer en cierto modo el amplio abanico de algoritmos que existen dedicados a la toma de decisiones, desde los clásicos métodos multicriterio, hasta algoritmos más recientes como el PSO, pasando por la aplicación del poderoso paradigma de las redes neuronales (aunque en este caso, debido a las dificultades de su entrenamiento, no se han mostrado como la opción más adecuada).

7.2.1. Criterios que gobiernan la evaluación de las soluciones

Para evaluar lo buena o mala que es una ordenación determinada de las entidades, se han definido unos criterios comunes y medibles, que permiten la comparación objetiva de todas las opciones de ordenación. Los criterios han sido estos:

- Coste material de ejecutar la reparación. Incluye coste de desplazamientos, coste material de la instalación de nuevos cableados, soldaduras/empalmes, etc.
- Coste humano de ejecutar la reparación. Depende de la cantidad de personas involucradas, su sueldo y el tiempo que dediquen a la tarea.
- Penalizaciones: coste directo de las penalizaciones por incumplimiento de la calidad de servicio contratada por los clientes afectados.

- Cese de ingresos por los clientes descontentos que rescinden su contrato y se cambian de operadora.
- Repercusión mediática, ante grandes cortes de servicio en hospitales, aeropuertos, etc. Esto constituye una publicidad negativa y como consecuencia, una disminución de la incorporación de nuevos clientes, que se dirigirán a otras operadoras. Este criterio se mide en unidades de tiempo (minutos) refiriéndose al tiempo de incomunicación acumulado de todos los circuitos cuyo corte tiene una gran repercusión mediática. El resto de criterios se miden en unidades monetarias.

Todos los criterios son del tipo “más es peor”, es decir, cuanto mayor sea el valor de la magnitud del criterio peor es la alternativa elegida que provoca ese valor. Básicamente esto ocurre porque todas las magnitudes de los criterios son costes para la operadora.

Cada criterio tiene como soporte una fórmula que permite el cálculo de su magnitud, en función de una serie de atributos que poseen las entidades a ordenar (circuitos), más otra serie de variables que se han establecido de forma fija (tiempos medios, costes medios, factores de complejidad, precios, etc.). Las fórmulas y la contribución de sus atributos componentes han sido definidas por el autor de este trabajo a partir de su conocimiento del problema en el entorno de una operadora de telecomunicación.

Las fórmulas de cálculo y los atributos que intervienen en ellas podrían haber sido otros. Es más, incluso los criterios podrían haber sido otros diferentes en lugar de estos cinco, y el resultado de la aplicación de los algoritmos podría haber sido entonces completamente diferente. Únicamente lo que el autor ha buscado cumplir es que tanto los criterios, como las fórmulas que rigen el cálculo de su valor, sean fáciles de explicar. El objetivo es que los organismos decisores puedan entender bien el planteamiento, e incluso que puedan participar en parte de su definición y lo vean como algo suyo, facilitando así que no pongan impedimentos en la adopción del sistema.

Los criterios han sido utilizados casi en todos los algoritmos, e incluso han participado en la comparación final entre todos ellos para saber cuál era mejor. Los únicos métodos en los que no han sido usados directamente han sido los basados en redes neuronales. En cierta medida, los criterios sí que influyen en parte en el funcionamiento de las redes neuronales. Pero es una influencia indirecta que tiene lugar durante la fase de entrenamiento, no en la fase de ejecución. Durante el entrenamiento (supervisado), los analistas deben alimentar la red con patrones de entrada y salida, para que la red aprenda. Aunque sea de manera inconsciente, en el establecimiento de los patrones adecuados de salida, por parte de los analistas, subyace la existencia de estos criterios planteados o de otros similares.

7.2.2. PSO, la mejor opción ensayada

Los tres primeros métodos de la lista: ELECTRE I, AHP, Red Neuronal opción A, se han basado en utilizar alternativas de ordenación, predefinidas y fijas (alternativas discretas). Esto es algo inherente a ELECTRE y AHP, puesto que son métodos multicriterio discretos. En el caso del modelado denominado “opción A” con redes neuronales, ha sido una imposición de este autor: se ha forzado a la red a generar unas alternativas discretas, precisamente con el objetivo de poder ser comparado con los otros dos, en los mismos términos.

Las alternativas elegidas han sido cinco. Son cinco formas concretas de ordenar los circuitos y caminos implicados en cada corte de red. Se basan en los atributos y propiedades que poseen las entidades implicadas, y establecen un orden estricto para todas ellas. Cada una otorga preponderancia a ciertos atributos o características, por lo que ninguna constituyen de manera aislada una ordenación óptima. La ventaja que sí poseen es que son fáciles de explicar y por tanto de entender para los decisores, con lo que aumentarían la confianza de éstos en el algoritmo.

En conclusión, en la aplicación de cualquiera de estos tres métodos, la solución siempre estará restringida a una de las cinco alternativas prefijadas. Podrían haberse definido más alternativas, pero igualmente la solución estaría limitada y acotada al conjunto posible de ellas.

Lo que no se puede negar a estos método es que son los mejores en tiempos de ejecución. Al ser algoritmos más simples su tiempo de computación está limitado y no crece indefinidamente.

Por su parte, los dos métodos basados en redes neuronales tienen como principal desventaja la fase de entrenamiento supervisado. Los resultados obtenidos en las simulaciones no han sido muy buenos porque el entrenamiento nunca pudo ser lo suficientemente completo. La paradoja es que para entrenar bien una red es necesario conocer de antemano la salida adecuada ante una cierta entrada, y ese es precisamente el problema que no se pudo resolver. Nadie sabe cuál es la salida correcta, nadie sabe cuál es la mejor ordenación de circuitos en la salida, ante un listado de entrada. Por eso los entrenamientos siempre fueron sesgados, sujetos a las subjetividades del entrenador.

En la utilización del algoritmo PSO, al igual que con la opción B de las redes neuronales, la ventaja principal que encontramos es que el método no necesita alternativas predefinidas. Parte de una ordenación inicial aleatoria, y a partir de ahí explora con libertad el espacio de búsqueda, de acuerdo a unos parámetros que rigen la velocidad de las partículas. En cada iteración el algoritmo puede seguir mejorando la solución encontrada, es decir, la calidad de la solución aumenta con el número de iteraciones, y por tanto con el tiempo de ejecución.

PSO implementa una búsqueda dirigida, dentro de todo el universo de posibles soluciones. Utiliza los mismos cinco criterios del resto de algoritmos para saber si las nuevas soluciones encontradas mejoran a las anteriores. Si no se establece una condición de parada sigue buscando sin detenerse. Normalmente esa condición debe ser un tiempo de computación máximo; cada vez que se produce un corte en la red no podemos esperar indefinidamente a obtener un orden de restauración para poder iniciar las reparaciones necesarias. Ese tiempo debe ser razonable, de unos pocos minutos como mucho.

A veces, antes de alcanzar ese tiempo máximo, el algoritmo habrá encontrado una solución estable, o lo que es lo mismo, habrá encontrado una solución que no varía al pasar las iteraciones. Puede ocurrir que sea un óptimo local o puede que sea una buena solución global. Un buen ajuste de los parámetros que gobiernan las exploración (α , β , γ) impedirá que la búsqueda caiga en óptimos locales prematuramente.

Para conseguir un buen compromiso entre la profundidad de exploración y el tiempo disponible de computación es necesario ejecutar el algoritmo sobre un sistema basado en un *HW/SW* de altas prestaciones. Adicionalmente se mejora mucho el rendimiento de la búsqueda realizando una implementación de PSO con procesamiento en paralelo. La implementación propuesta en este sentido se basaría en lanzar varios procesos de búsqueda PSO en paralelo, sobre todo el universo de búsqueda, y cada cierto tiempo realizar una puesta en común de la mejor solución encontrada por

cada proceso. Dichas soluciones serían evaluadas entre sí, y la mejor de todas ellas sería establecida como mejor hasta el momento en todos los procesos, continuando así la exploración. En cualquier caso este planteamiento forma parte de las líneas futuras de investigación ya que no se ha desarrollado en el presente trabajo.

7.3. Líneas futuras de trabajo

Se detallan en esta apartado las posibles líneas futuras de trabajo.

Una de las principales es industrializar el desarrollo. Es decir construir un sistema funcionalmente completo preparado para su aplicación “comercial”, y que no se quede en un simple experimento de laboratorio. Esto implica realizar una inversión en el desarrollo del *software*. Es necesario construir:

- Una capa de interfaz web, con diferentes perfiles de acceso, al menos los siguientes: usuarios (que simplemente operan el sistema), supervisores (que tienen acceso a las estadísticas de funcionamiento), administradores (que son capaces de modificar parámetros del algoritmo).
- Un módulo central basado en el algoritmo PSO, con todas sus variables parametrizadas y accesibles, de manera que se puedan publicar en el portal web a los usuarios con perfil de administración.
- Una parametrización sencilla sobre el modelado de los criterios que intervienen en las comparaciones. Debe ser fácil modificarlos y con la posibilidad de añadir nuevos o quitar los existentes por defecto.
- Flexibilidad para despliegues en paralelo dependiendo de la cantidad de procesos simultáneos que soporte el *hardware* en el que se instale.
- Un potente módulo de reportes y estadísticas para demostrar el funcionamiento a los inversores que adquieran y operen el sistema.
- Un módulo adicional que, una vez que el algoritmo ha generado una ordenación óptima, reparta las tareas eficientemente dentro del grupo de operadores de mantenimiento disponibles para hacer las reparaciones en la red.

Otra línea, que también sería necesaria para industrializar el sistema, es profundizar en la implementación en paralelo del algoritmo PSO propuesto. Hay que realizar simulaciones sobre los efectos de modificar los diferentes parámetros que gobiernan la implementación en paralelo, para conseguir encontrar una buena implementación.

También vale la pena investigar la utilización de otros métodos que, al igual que PSO, no presupongan la definición de un número limitado de alternativas de ordenación. Es decir, que solamente a partir del tratamiento de todos los atributos de los caminos y circuitos afectados puedan producir la ordenación relativa de los mismos de cara a su restauración.

En cuanto a los criterios utilizados para evaluar las alternativas de decisión, también se puede plantear su redefinición o incluso incorporar algunos nuevos. Merece especial atención el criterio relacionado con la repercusión que tiene en los medios de comunicación los grandes cortes de servicio. Este es un criterio cualitativo y difícil de medir. La publicidad negativa y mala imagen que genera una gran corte de servicios de telecomunicación puede provocar un gran impacto en el negocio de una compañía. Es especialmente grave si ese corte afecta a algún servicio público

esencial (un hospital, un centro de emergencias, comunicaciones gubernamentales, etc). Por tanto, dada su influencia, sería necesario profundizar sobre un modelo más detallado de este criterio, y sobre su cuantificación para poder hacerlo medible. Ese modelo detallado probablemente necesite de herramientas que han quedado fuera del alcance de la presente tesis, como por ejemplo el uso de encuestas a los clientes, estudios de correlación de los efectos de grandes cortes en el pasado sobre las contrataciones de nuevos servicios, etc.

Por último, dentro del entorno de trabajo relacionado con las compañías operadoras de telecomunicaciones se podría extender el uso de algoritmo de priorización como este, a otra redes, como por ejemplo la red de acceso, sobre la que el autor ya ha publicado algún artículo [56]. También sería útil aplicarlo a otros procesos más allá de los procesos de mantenimiento, como por ejemplo a los procesos de provisión de servicios complejos (por ejemplo los servicios de comunicación destinados a empresas) que se componen de muchas tareas interrelacionadas y que no siempre se ejecutan en un orden óptimo.

7.4. Principales aportaciones realizadas

En líneas generales, la principal aportaciones que supone la presente tesis son las siguientes:

- Se ha realizado un modelado del problema de la restauración de entidades cortadas en una red de transporte, a partir de atributos y valores que están disponibles en los sistemas de gestión habituales que usan los departamentos de mantenimiento de las operadoras. Ese modelado permite la aplicación sistemática de cualquier algoritmo de decisión, y particularmente permite la aplicación de los presentados en este trabajo. Incluye la definición de unos criterios suficientemente genéricos para posibilitar una amplia aplicación en las diferentes compañías operadoras. Esta parte ha dado lugar a dos publicaciones [55] y [56].
- Se ha ensayado con éxito una variante del algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), con las siguientes características:
 - realizando una adaptación para aplicarlo a un problema de ordenación (espacio unidimensional),
 - y aplicando una forma particular de evaluar la mejor posición global del enjambre. La evaluación consiste en utilizar un método multicriterio discreto (ELECTRE I) tomando como alternativas la mejor posición global hasta el momento y la posición global en cada iteración, y tomando como criterios los criterios generales definidos en el modelado inicial. Dado que estas adaptaciones han sido de reciente implementación, el propósito del autor de esta tesis es realizar en los siguientes meses una publicación de estos resultados en algún congreso internacional.
- Aprovechando la aplicación de los algoritmos de decisión a un problema concreto del mundo de las telecomunicaciones, el autor ha realizado, en la primera parte, una exposición de lo que es una empresa Operadora de telecomunicaciones, de sus departamentos y procesos internos, de los servicios que ofrece y de las redes sobre las que se soportan. De hecho se publicó en [127] una panorámica de los procesos de mantenimiento. Ese apartado también incluye una recopilación de reflexiones sobre la implementación de grandes Sistemas informáticos de Gestión, fruto de la experiencia profesional del autor de esta tesis, en este campo, tras muchos años de trabajo con operadoras de varios países. Su lectura puede servir de bastante ayuda para

cualquiera que pretenda iniciarse en el mundo de los sistemas de gestión y trabajar en este sector. Con ese propósito ha sido escrito.

8. GLOSARIO

Glosario de términos y acrónimos.

- AHP: *Analytic Hierarchy Process*. Proceso Analítico Jerárquico. Es uno de los métodos de la teoría de la decisión dentro del ámbito de decisiones multicriterio discreto.
- ANN: *Artificial Neural Network*. Véase RNA.
- ANS: *Acuerdo de Nivel de Servicio* (SLA en inglés). Contrato entre un proveedor de un servicio y su cliente fijando el nivel de calidad de dicho servicio.
- BPM: *Business Process Management*. Gestión de Procesos de Negocio. Metodología cuyo objetivo es optimizar los procesos dentro de una organización. También aplicable a sistemas que dan soporte a dichos procesos.
- BRP: *Business Rules Platform*. Plataforma o motor de reglas que soportan una serie de reglas de procesos de negocio.
- BSS: *Business Support Systems*. Sistemas de Soporte al Negocio. Dentro de la clasificación del TMF de los sistemas, los que dan soporte a los procesos de nivel de negocio, por oposición a los OSS que son los que dan soporte a los procesos de nivel de red.
- CP: *Compromise Programming*. Programación Compromiso. Es uno de los métodos de la teoría de la decisión dentro del ámbito de la decisión multicriterio continuo.
- DSLAM: *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*. Equipo, dentro de la red de acceso de una operadora de telecomunicación, que agrega y multiplexa el tráfico de internet procedente de los bucles de abonado.
- DWDM: *Dense Wavelength-Division multiplexing*. Tecnología de transmisión que mediante multiplexación en diferentes longitudes de onda permite comunicar varias señales dentro de una misma fibra óptica.
- EAI: *Enterprise Application Integration*. Integración de Aplicaciones Empresariales. Se define como el uso de sistemas informáticos para integrar un conjunto de aplicaciones, dentro de cualquier empresa.
- ELECTRE: *Elimination et Choix Traduisant la Réalité*. Eliminación y Elección Traduciendo la Realidad. Familia de métodos de la teoría de la decisión dentro del ámbito de decisiones multicriterio discreto, basado en lo que se denomina como relaciones de superación.
- ERX: *Edge Router Switch*. Conmutador y Enrutador de Borde de red. Equipo, dentro de la red metropolitana de una operadora de telecomunicación, que agrega y multiplexa el tráfico de internet procedente de decenas de equipos DSLAM.
- eTOM: *Enhanced Telecom Operations Map*. Mapa de Operaciones de Telecomunicación Mejorado. Desarrollado por la organización Telemangement Forum es un catálogo que estandariza y da una estructura coherente a todo el conjunto de procesos que existen en una empresa de telecomunicaciones.

GP:	<i>Goal Programming</i> . Programación por objetivos. Es uno de los métodos de la teoría de la decisión dentro del ámbito de la decisión multicriterio continuo. Basado en la denominada lógica satisfaciente enunciada por Simon.
GPON:	<i>Gigabit Passive Optical Network</i> . Red Óptica Pasiva a velocidades de Gigabit por segundo. Tecnología de transmisión de señales ópticas que se basa en la distribución de la información mediante elementos pasivos (divisores). Utilizada en las redes de acceso para sustituir al tradicional acceso a internet mediante DSLAMs.
IPTV:	<i>IP Television</i> . Televisión por IP. Servicio o tecnología de transmisión de una señal de televisión por una red de conmutación de paquetes (protocolo IP).
ITIL:	<i>Information Technology Infrastructure Library</i> . Biblioteca de Infraestructura de Tecnologías de Información. Es un conjunto de conceptos y buenas prácticas para la gestión de servicios de telecomunicación en particular, y tecnologías de la información en general.
ITU:	<i>International Telecommunication Union</i> . Véase UIT.
JDP:	Jerarquía Digital Plesiócrona (PDH en inglés). Tecnología de transmisión basada en la multiplexación de señales en secuencias binarias de velocidad cada vez mayor.
JDS:	Jerarquía Digital Síncrona (SDH en inglés). Tecnología de transmisión basada en la multiplexación de señales, al igual que la JDP, pero con una estructura de trama binaria más avanzada que permite mayores velocidades y mayor flexibilidad en la extracción o inserción de señales en equipos intermedios de la red.
MOP:	<i>Multiobjective Programming</i> . Programación multiobjetivo. Es uno de los métodos de la teoría de la decisión dentro del ámbito de la decisión multicriterio continuo.
NMS:	<i>Network Management System</i> . Sistema de Gestión de Nivel de Red. Dentro de la visión clásica de clasificación de sistemas de telecomunicación sería lo equivalente a los OSS definidos por el TM Forum.
O+M:	Operación y Mantenimiento. Departamento o proceso, dentro de una operadora de telecomunicación, que se encarga de operar los equipos y conexiones de red, y de realizar el mantenimiento ante fallos en dichos elementos.
ONT:	<i>Optical Network Terminal</i> . Terminador de Red Óptico. Equipo que se instala en casa de cliente en una red GPON.
OLT:	<i>Optical Line Terminal</i> . Terminador de Línea Óptico. Equipo que concentra el tráfico de cientos de ONTs en una red GPON.
OSS:	<i>Operations Support Systems</i> . Sistemas de Soporte a la Operación. Dentro de la clasificación del TMF de los sistemas, los que dan soporte a los procesos de nivel de red, por oposición a los BSS que son los que dan soporte a los procesos de nivel de negocio.
PDH:	<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i> . Véase JDP.

- PROMETHEE: *Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations*. Método de la teoría de la decisión, dentro del ámbito de decisiones multicriterio discreto, que maneja los conceptos de preferencia estricta y de indiferencia.
- PSO: *Particle Swarm Optimization*. Optimización por Enjambre de Partículas. Método de optimización englobado dentro de la familia de métodos SWARM (que pertenecen a una rama de la Inteligencia artificial que estudia el comportamiento colectivo de sistemas que no tienen un ente director, que se auto-organizan de forma descentralizada), basado en los enjambres de individuos.
- QoS: *Quality of Service*. Calidad de Servicio. Magnitud que mide la calidad de los servicios de telecomunicación considerando aspectos del servicio de red tales como tasas de errores, ancho de banda, rendimiento, retraso en la transmisión, disponibilidad, etc
- RNA: Red Neuronal Artificial (ANN en inglés). Sistema que emula el funcionamiento del sistema nervioso de los animales, consistente en neuronas interconectadas colaborando para producir una cierta salida en función de unos estímulos de entrada
- RPV: Red Privada Virtual (VPN en inglés)
- SDH: *Synchronous Digital Hierarchy*. Véase JDS.
- SID: *Shared Information and Data model*. Modelo de datos (definido por TMForum) que ayuda a clasificar todos los conceptos susceptibles de ser inventariados en los sistemas de gestión de telecomunicaciones.
- SLA: *Service Level Agreement*. Véase ANS.
- TAM: *Telecom Applications Map*. Mapa de Aplicaciones de Telecomunicación. Marco de referencia (definido por TMForum) que ayuda a clasificar los sistemas de telecomunicación. De la misma manera que el eTOM define procesos, TAM define sistemas sobre los cuales se implementarán dichos procesos.
- TMF: *Telecommunication Management Forum*. Foro de Gestión de las Telecomunicaciones. Organismo creado en 1988 como una asociación de empresas sin ánimo de lucro, para estandarizar aspectos relacionados con la industria de las telecomunicaciones.
- TMForum: *Telecommunication Management Forum*. Véase TMF.
- TNA: *Technology-Neutral Architecture*. Arquitectura Independiente de la Tecnología. Marco de referencia (definido por TMForum) para clasificar la arquitectura los sistemas de telecomunicación, independientemente de su tecnología de implementación.
- UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU en inglés). Es el organismo especializado en telecomunicaciones de la Organización de las Naciones Unidas (aunque sus inicios se remontan a 1865), encargado de regular las telecomunicaciones a nivel internacional entre las distintas administraciones y empresas operadoras.
- VPN: *Virtual Private Network*. Red Privada Virtual. Es una tecnología de red que permite una extensión segura de una red local sobre una red pública (habitualmente la red de acceso a Internet).

- WAN: *Wide Area Network*. Red de Área Extensa. Denominación que aplica a redes de comunicación (normalmente con tecnología IP) que ocupan una gran área, por ejemplo, a nivel nacional.
- WDM: *Wavelength-Division multiplexing*. Tecnología de transmisión que mediante multiplexación en diferentes longitudes de onda permite comunicar varias señales dentro de una misma fibra óptica. Similar a DWDM, pero más antigua, multiplexando menos señales en la misma fibra.

9. REFERENCIAS

Listado de referencias.

Relacionadas con conceptos genéricos de Redes de Telecomunicación:

- [1] ITU-T standard G.702. "Digital Hierarchy bit rates". 11-1988.
- [2] ITU-T standard G.705. "Characteristics of plesiochronous digital hierarchy (PDH) equipment functional blocks". 10-2000.
- [3] ITU-T standard G.780/Y.1351. "Terms and definitions for synchronous digital hierarchy (SDH) networks". 7-2010.
- [4] ITU-T standard G.783. "Characteristics of synchronous digital hierarchy (SDH) equipment functional blocks". 3-2006.
- [5] Recomendación UIT-T G.784. "Management aspects of synchronous digital hierarchy (SDH) transport network elements". 03-2008.
- [6] ITU-T standard G.800. "Unified functional architecture of transport networks". 02-2012.
- [7] ITU-T standard G.803. "Architecture of transport networks based on the synchronous digital hierarchy (SDH)". 03-2000.
- [8] ITU-T standard G.805. "Generic functional architecture of transport networks". 03-2000.
- [9] ITU-T standard G.809. "Functional architecture of connectionless layer networks". 03-2003.
- [10] ITU-T standard G.851.1. "Management of the transport network – Application of the RM-ODP framework". 11-1996.
- [11] ITU-T standard G.852.2. "Enterprise viewpoint description of transport network resource model". 03-1999.
- [12] ITU-T standard G.872. "Architecture of optical transport networks". 10-2012".
- [13] ITU-T standard G.921. "Digital sections based on the 2048 kbit/s hierarchy. 11-1988".
- [14] ITU-T standard G.971. "General features of optical fibre submarine cable systems. 07-2010".
- [15] ITU-T standard G.983.1. "Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)". 01-2005.
- [16] ITU-T standard G.984.1. "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics". 03-2008.
- [17] ITU-T standard G.991.1. "High bit rate digital subscriber line (HDSL) transceivers". 10-1998.
- [18] ITU-T standard G.992.1. "Asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers". 07-1999.
- [19] ITU-T standard G.993.1. "Very high speed digital subscriber line transceivers (VDSL)". 06-2004.
- [20] ITU-T standard M.562: "Types of circuit and circuit section". 11-1988.

- [21] ITU-T standard M.1015. "Types of transmission on leased circuits". 11-1988.
- [22] ITU-T standard M.1130. "General definitions and general principles of operation/maintenance procedures to be used in satellite mobile systems". 10-1992.
- [23] ITU-T standard M.1040. "Characteristics of ordinary quality international leased circuits". 11-1988.
- [24] ITU-T standard M.1060. "Maintenance of international leased circuits". 11-1988.
- [25] ITU-T standard M.1301. "General description and operational procedures for international SDH leased circuits". 01-2001.
- [26] ITU-T standard M.2140. "Transport network event correlation". 2-2000.
- [27] ITU-T standard M.3010. "Principles for a telecommunications management network". 3-2007.
- [28] ITU-T standard M.3050.0. "Enhanced Telecom Operations Map (eTOM) – Introduction". 3-2007.
- [29] ITU-T standard M.3050.1. "Enhanced Telecom Operations Map (eTOM) – The business process framework". 3-2007.
- [30] M.3050.2. "Enhanced Telecom Operations Map (eTOM) – Process decompositions and descriptions". 3-2007.
- [31] ITU-T standard M.3050.3. "Enhanced Telecom Operations Map (eTOM) – Representative process flows". 3-2007.
- [32] ITU-T standard M.3060/Y.2401. "Principles for the Management of Next Generation Networks". 3-2006.
- [33] ITU-T standard M.3100. "Generic network information model". 4-2005.
- [34] ITU-T standard M.3190. "Shared information and data model (SID)". 7-2008.
- [35] ITU-T standard M.3200. "TMN management services and telecommunications managed areas: overview". 4-1997.
- [36] ITU-T standard M.3208.1: "Leased circuit services". 10-1997.
- [37] Telemanagement Forum, <https://www.tmforum.org>

Relacionadas con Teoría de la Decisión de forma genérica:

- [38] Aguezoul, A. Rabenasolo, B. Jolly-Desodt, A.-M., 2006. "Multicriteria Decision Aid Tool for Third-Party Logistics Providers' Selection". International Conference on Service Systems and Service Management, vol. 2, pp. 912 – 916.
- [39] Antón, J.M. and Grau, J. B. "Madrid-Valencia high-speed rail line: a route selection", Proceeding of the Institution of Civil Engineers. Transport 157, pp 153-161. 2004.
- [40] Antón, J.M.; Grau, J. B.; Sánchez, E.M. "Compromise Programming in Financial Analysis for Strategic Management". Transactions of WAC-2004, vol. 17, pp. 555 – 560. USA. 2004.
- [41] Applegate, D., Bixby, R., Chavátal, V. y Cook, W. "The Traveling Salesman Problem: A Computational Study". Pág. 1-3. 2011.

- [42] French, S. "Decision theory: an introduction to the mathematics of rationality". Ellis Horwood, Chichester (1988).
- [43] Gass, S.I. "Decision making: Models and Algorithms". John Wiley & sons, New York (1985)
- [44] Grau, Juan B. "Métodos Matemáticos para la Toma de Decisiones". Curso Universidad Católica de Córdoba". 2005.
- [45] Gutin, G. y Punnen, A. "The Traveling Salesman Problem and Its Variations". Pág. 9-15. 2007.
- [46] Hwang, C.L., Yoon, K. "Multiple Attribute Decision Making – Methods and Applications, A State-of-the-Art Survey". New-York: Springer-Verlag. 1981.
- [47] Hwang, C.L., Lin, M.J. "Group Decision Making Under Multiple Criteria". New-York: Springer-Verlag. 1987.
- [48] Infante, R. "Teoría de la decisión". UNED, Madrid (1976)
- [49] Lin, S. "Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem". The Bell System Technical Journal. Volume 44, Issue 10. Pág.2245-2269. 1965.
- [50] MacCimmon, K.R. "Decision making among multiple attribute alternatives: A survey and consolidated approach". RAND Memorandum, RM-4823-ARPA. 1986.
- [51] Masud, Abu S. M., y A. Ravindran Ravi. "Multiple Criteria Decision Making". En Operations Research ang Management Science Handbook, de A. Ravi Ravindran, 5-1-5-41. New York: CRC Press Taylor&Francis Group, 2008.
- [52] Romero, C. "Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones". Alianza Universidad. 1993.
- [53] Romero, C. "Análisis de las Decisiones Multicriterio". Editorial Isdefe, Madrid. 1996.
- [54] Ross, P. "Search Methodologies", Chapter 17: Hyper heuristics. Pág. 529-531. 2005.

Relacionadas con Métodos ELECTRE:

- [55] Alarcón, M.J.; Grau, J.B.; Torres, J., "Application of ELECTRE I Method to Restoration Actions in Telecommunication Network Maintenance," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007.*, vol., no., pp.3430-3434, 4-7 June 2007.
- [56] Alarcón, M.J.; Andina, D.; Grau, J.B.; Torres, J., "Service Assurance in Fixed Broadband Access Networks," *49th Federation of Telecommunications Engineers of The European Union (Fitce) Congress (2010)*. Santiago de Compostela. September 2010.
- [57] Antón, J.M.; Grau, J. B.; Andina, D. "Electre and AHP MCDM Methods Versus CP Method and the Official choice Applied to High-Speed Railway Layout alternative election". WSEAS Transactions on Business and Economics, vol. 1, pp. 64 – 70. 2004.
- [58] Roy, B., "The Outranking Approach and the Foundations of ELECTRE Methods. Theory and Decision". 1991.

- [59] Roy, B., Bertier, P. "La methode Electre II: Une application au media-planing". In: M. Ross (ed.), VIIeme Conference Internationale de Recherche Operationnelle, pp. 291-302. Dublin, OR72, North-Holland, Amsterdam. 1973.
- [60] Roy, B. "Electra III: Un algorithme de classement fonde sur une representation floue des preferences en presence de criteres multiples". Cahiers du Centre d'Etude de Recherche Operationnelle, 20, pp. 3-24. 1978.
- [61] Tiefeng Zhang, Jinsha Yuan. 2005. "Decision-aid for power distribution system planning problems using ELECTRE III". The 7th International Power Engineering Conference, vol. 2, pp. 317.

Relacionadas con Métodos PROMETHEE:

- [62] Brans J.P. and Ph. Vincke. "A Preference ranking Organization Method. The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making". In Management Science, Vol. 31, N° 6, pp 647-656. June 1985.
- [63] Fernández B., Gabriela M. "Los métodos PROMETHEE: una metodología de ayuda a la toma de decisiones multicriterio discretas". En Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA. España. 2002.

Relacionadas con Método AHP:

- [64] Korhonen, P.J. "A hierarchical interactive method for ranking alternatives with multiple qualitative criteria". European Journal of Operations Research, 24., pp. 265-276. 1986.
- [65] Saaty, Tomas L. "Multicriteria decision Making: The Analytic Hierarchy Process". New York: McGraw Hill, 1980.
- [66] Saaty, Thomas L. "Toma De Decisiones Para Líderes: El proceso analítico jerárquico la toma de decisiones en un mundo complejo". Pittsburgh: RWS Publications, 1997.

Relacionadas con Redes Neuronales:

- [67] Andina, D.; Marcano-Cedeño, A.; Torres, J.; Alarcon, M.J. "Testing artificial metaplasticity in MLP applications". IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2009). San Antonio, TX, USA, 11-14 October 2009.
- [68] Andina D, Alarcón MJ. "A Neural Network as Rank Detector ", Proc. of VIII Latin American Congress on Automatic Control and XIII Congress of the Chilean Association on Automatic Control, Vol I, pp. 201-205, Viña del Mar, Chile, Noviembre 1998.
- [69] D. Andina, A Vega-Corona, J.I. Seijas and M.J. Alarcón. "Application of Neural Networks". Computational Intelligence for Engineering and Manufacturing. Springer. ISBN: 10 0-387-37450-7. Pages 93-108. Alemania, 2007.
- [70] Diego Andina, , Santiago Torres-Alegre, Martín J Alarcón, Juan I Seijas, Marta de-Pablos-Álvaro. "Robustness of artificial metaplasticity learning algorithm". Neurocomputing. Volume 151, Part 1, 3. Pages 49–54. March 2015.
- [71] Gurney K. "An Introduction to Neural Networks". UCL Press, 1997, ISBN 1 85728 503 4.

- [72] Martín J. Alarcón, Santiago Torres-Alegre, Diego Andina. "Behaviour of a Binary Detector based on an ANN Digital Implementation in the presence of SEU Simulations". Artículo del congreso SCI 99 e ISAS 99, Orlando-Florida (EEUU), 4/08/1999.
- [73] P.D. Wasserman. "Neural Computing". Van Nostrand Reinhol, New York 1989.
- [74] S.Haykin. "Neural Networks". Prentice Hall, 2nd edition, 1999
- [75] S. Y. Kung. "Digital Neural Networks". PTR Prentice Hall, Inc. 1993

Relacionadas con Métodos PSO:

- [76] Beni, G., Wang, J. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems, Proceed. NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems, Tuscany, Italy, June 26–30 (1989).
- [77] C. Cotta, A. Mendes, V. García, P. França, and P. Moscato, "Applying Memetic Algorithms to the Analysis of Microarray Data," in Proceedings of the Applications of Evolutionary Computing, Berlin, 2003, vol. 2611 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 22-32, Springer-Verlag.
- [78] E. Alba, Ed., Parallel Metaheuristics: A New Class of Algorithms, Wiley, 2005.
- [79] E. Alba, F. Almeida, M. Blesa, C. Cotta, M. Díaz, I. Dorta, J. Gabarró, C. León, G. Luque, J. Petit, C. Rodríguez, A. Rojas, and F. Xhafa, "Efficient Parallel LAN/WAN Algorithms for Optimization. The MALLBA Project" Parallel Computing, vol. 32, no. 5-6, pp. 415-440, June 2006.
- [80] E. Alba, J. García-Nieto y G. Luque, "Algoritmos Basados en Cúmulos de Partículas para el Análisis de Microarrays de ADN" en Actas del V Congreso Español sobre Metaheurísticas. Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados. Puerto de la Cruz, 14, 15 y 16 de Febrero de 2007 . págs. 419-426, 2007. ISBN: 978-84-690-3470-5.
- [81] Eberhart, R. y Kennedy, J. "A New Optimizer Using Particle Swarm Theory". Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science". 0-7803-2676-8/95. Pág. 39-43. 1995.
- [82] Ender Ozcan and Chilukuri K Mohan. "Analysis of a simple particle swarm optimization system". Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks, 8:253–258, 1998.
- [83] Fan, H. "Discrete Particle Swarm Optimization for TSP based on Neighborhood" in Journal of Computational Information Systems 6:10. Pág. 3407-3413. 2010.
- [84] J. Kennedy and R.C. Eberhart. "A discrete binary version of the particle swarm algorithm". In Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation., 1997 IEEE International Conference on, volume 5, pages 4104–4108 vol.5, 1997. doi: 10.1109/ICSMC.1997.637339.
- [85] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization" in Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, vol. 4, pp. 1942-1948. Nov 1995.
- [86] James Kennedy and Russell C. Eberhart. "Swarm intelligence". Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2001. ISBN 1-55860-595-9.
- [87] K. Yasuda, A. Ide, and N. Iwasaki. "Adaptive particle swarm optimization". In Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on, volume 2, pages 1554–1559 vol.2, 2003. doi: 10.1109/ICSMC.2003.1244633.

- [88] Maurice Clerc. "Discrete particle swarm optimization illustrated by the traveling salesman problem". *New optimization techniques in engineering*, 141:219–239, 2004.
- [89] M. Clerc and J. Kennedy. "The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space". *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(1):58–73, 2002. ISSN 1089-778X. doi: 10.1109/4235.985692.
- [90] M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stutzle. "Ant colony optimization". *Computational Intelligence Magazine, IEEE*, 1(4):28–39, 2006. ISSN 1556-603X. doi: 10.1109/MCI.2006.329691.
- [91] M.E.H. Pedersen and A.J. Chipperfield. "Simplifying particle swarm optimization". *Applied Soft Computing*, 10(2):618 – 628, 2010. ISSN 1568-4946. doi: 10.1016/j.asoc.2009.08.029.
- [92] P.J. Angeline. "Using selection to improve particle swarm optimization". In *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*, pages 84–89, 1998. doi: 10.1109/ICEC.1998.699327.
- [93] R. Brits, A.P. Engelbrecht, and F. van den Bergh. "Locating multiple optima using particle swarm optimization". *Applied Mathematics and Computation*, 189(2): 1859 – 1883, 2007. ISSN 0096-3003. doi: 10.1016/j.amc.2006.12.066.
- [94] R. Eberhart and Y. Shi, "Comparing Inertia Weights and Constriction Factors in Particle Swarm Optimization" in *Proceedings of the International Congress on Evolutionary Computation*, July 2000, vol. 1, pp. 84-88.
- [95] Wei Pang, Kang pingWang, Chun guang Zhou, and Long jiang Dong, "Fuzzy Discrete Particle Swarm Optimization for Solving Traveling Salesman Problem," cit, vol. 00, pp. 796-800, 2004.
- [96] X. Xie, W. Zhang Z., and Yang, "Solving Numerical Optimization Problems by Simulating Particulates in Potential Field with Cooperative Agents" in *International Conference on Artificial Intelligence*, Las Vegas, NV, USA, 2002.
- [97] Xiaodong Li. "Particle swarm optimization: an introduction and its recent developments". In *School of Computer Science and IT(2006), RMIT University, SEAL'06*, 2006.
- [98] Yuhui Shi and R. Eberhart. "A modified particle swarm optimizer". In *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*, pages 69–73, 1998. doi: 10.1109/ICEC.1998.699146.

Relacionadas con Sistemas de Telecomunicaciones:

- [99] Ahmed Dehili, "Evolution of Access Networks to support video Quality requirements," *12th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, 2006. NETWORKS 2006.*, vol., no., pp.1-3, Nov. 2006.
- [100] AMDOCS, <http://www.amdocs.com>
- [101] Carpenter T.; Eiger M.; Shallcross D.; Seymour P., "Node Placement and Sizing for Copper Broadband Access Networks", *Annals of Operations Research*, Volume 106, Numbers 1-4, September 2001 , pp. 199-228(30).
- [102] Comarch, <http://www.comarch.com>
- [103] ESRI, <http://www.esri.com>

- [104] Hayashi, M.; Fukuda, K.; Abe, T. "Evaluation of post-disaster restoration policies for telecommunication services". IEEE Network Operations and Management Symposium, vol. 1, pp. 248 – 257. 1996
- [105] IBM, <http://www.ibm.com>
- [106] Infovista, <http://www.infovista.com>
- [107] Jie Zhang; Jun Yang; Aydin, M.E.; Wu, J.Y., "Mathematical Modelling and Comparisons of Four Heuristic Optimization Algorithms for WCDMA Radio Network Planning," *2006 International Conference on Transparent Optical Networks*, vol.3, pp.253-257, 18-22 June 2006.
- [108] Jih-Wei Tsai; Chung-Shih Tang; Chii-Lian Lin; Chin-Ywu Twu; Sheng-Wang Yu, "Availability analysis of a broadband IP network in Taiwan," *The 6th International Conference on Advanced Communication Technology*, 2004., vol.2, no., pp. 923-926, 2004.
- [109] Kompatsiaris, I.; Strintzis, M.G.; Orfanos, I., "Using asymmetric digital subscriber line (ADSL) for fast Internet and multimedia services," *International Conference on Consumer Electronics, 2000. ICCE. 2000 Digest of Technical Papers.*, vol., no., pp.74-75, 2000.
- [110] Kurien, A.M.; Van Wyk, B.J.; Snyman, L.W., "An environment-based network planning tool," *12th International Symposium on Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications, 2004. EDMO 2004.*, vol., no., pp. 96-101, 8-9 Nov. 2004.
- [111] L.F. Ibrahim, "Using of Clustering and Ant-Colony Algorithms CWSP-PAM-ANT in Network Planning," *Digital Telecommunications, 2006. ICDT '06. International Conference on*, vol., no., pp.63-63, 2006.
- [112] Liu, J.; Worrall, K.P., "Theory and practice in 3G network planning," *Third International Conference on (Conf. Publ. No. 489) 3G Mobile Communication Technologies*, 2002., vol., no., pp. 74-80, 8-10 May 2002.
- [113] Elkamchouchi, H.M.; Elragal, H.M.; Makar, M.A., "Cellular Radio Network Planning using Particle Swarm Optimization," *NRSC 2007. National Radio Science Conference, 2007.*, vol., no., pp.1-8, 13-15 March 2007.
- [114] Yong-Kyung Lee; Dongmyun Lee, "Broadband access in Korea: experience and future perspective," *Communications Magazine, IEEE* , vol.41, no.12, pp. 30-36, Dec. 2003.
- [115] K. F. Poon , A. Conway , G. Wardrop , J. Mellis, "Successful Application of Genetic Algorithms to Network Design and Planning, " *BT Technology Journal*, v.18, n.4, p. 32-41, October 2000.
- [116] Cameron A.F.; Thorne D.J.; Foster K.T.; Fisher S.I., "Fixed access network technologies," *BT Technology Journal*, Vol. 22, No. 2, April 2004., pp. 48-59(12).
- [117] Foster, K. T., Young, G., Cook, J. W., Clarke, D. E., Kirby, R. H., and Booth, M. G., "Realising the Potential of Access Networks Using DSL," *BT Technology Journal* v.16, n.4 (Oct. 1998), 34-47.
- [118] E. Amaldi, A. Capone, M. Cesana, F. Malucelli, "Optimization Models for the Radio Planning of Wireless Mesh Networks," I.F. Akyildiz et al. (Eds.): *Networking 2007*, LNCS 4479, pp. 287–298, 2007.
- [119] J. Sánchez, J.A. Lozano, M. J. Alarcón, V. Postigo. "Qsn: a Model to the Network-Service Interface". Póster del congreso IEEE/IFIP 1998 Network Operations and Management Symposium. Nueva Orleans (E.E.U.U.). Fecha: 20/02/1998

- [120] J. Sánchez, J.A. Lozano, M. J. Alarcón, V. Postigo. "Achieving interoperability in a multivendor SDH network". Artículo del congreso: Fifth IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management. 1996.
- [121] Jakobson, G.; Weissman, M., "Alarm correlation," *IEEE Network*, vol.7, no.6, pp.52-59, Nov 1993.
- [122] Juan Carlos Viana Infante, Martín J. Alarcón Mondéjar. "Hacia la gestión integrada de los datos de la planta". Artículo de la revista Comunicaciones de Telefónica I+D. Clave: A. Volumen: 18. Páginas: 45-53. Fecha: 1/06/2000. ISSN: 1130-4693.
- [123] M. D'Arienzo, A. Pescapé, G. Ventre, "Dynamic Service Management in Heterogeneous Networks," *Journal of Network and Systems Management*, Vol. 12, No. 3, September 2004.
- [124] W-G. Teng, M-S. Chen, and P.S. Yu, "A Regression-based Temporal Pattern Mining Scheme for Data Streams," *Proceedings of the International Conference on Very Large Data Bases*, Berlin, Germany, Sept. 2003.
- [125] M. Klemettinen, H. Mannila, H. Toivonen, "Interactive exploration of interesting findings in the Telecommunication Network Alarm Sequence Analyzer (TASA)," *Information and Software Technology*, Volume 41, Issue 9, 25 June 1999, Pages 557-567.
- [126] Mark Madsen (1996) *ANSAwise* - Telecommunications Network Management. <http://www.ansa.co.uk>
- [127] Martín J. Alarcón, Francisco J. Zorzano, Aleksandar Jevtic and Diego Andina. "Telecommunications Network Planning and Maintenance". 12th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2008). Orlando, USA, from June 29th to July 2nd, 2008.
- [128] ORACLE, <http://www.oracle.com>
- [129] Horst F. Wedde, Muddassar Farooq, "A comprehensive review of nature inspired routing algorithms for fixed telecommunication networks," *Journal of Systems Architecture*, Volume 52, Issues 8-9, Nature-Inspired Applications and Systems, August-September 2006, Pages 461-484.
- [130] Byoung-Seong Park; Jong-Gwan Yook; Han-Kyu Park, "The determination of base station placement and transmit power in an inhomogeneous traffic distribution for radio network planning," *IEEE 56th Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings of the VTC 2002-Fall*. 2002, vol.4, pp. 2051-2055, 2002.
- [131] Alessio Botta, Donato Emma, Antonio Pescapé, Giorgio Ventre, "Systematic Performance Modeling and Characterization of Heterogeneous IP Networks", *Journal of Computer and System Sciences*, Volume 72, Issue 7, Performance modelling and evaluation of computer systems, November 2006, Pages 1134-1143, Elsevier.
- [132] Gerhard Haßlinger, Joachim Mende, Rüdiger Geib, Thomas Beckhaus, Franz Hartleb, "Measurement and Characteristics of Aggregated Traffic in Broadband Access Networks," *International Teletraffic Congress 2007*: 998-1010, 2007.
- [133] Nguyen, T.H.; Sadiku, M.N.O., "Next generation networks," *IEEE Potentials*, vol.21, no.2, pp.6-8, Apr/May 2002.
- [134] Azzouna, N.B.; Guillemin, F., "Analysis of ADSL traffic on an IP backbone link," *IEEE Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03*, vol.7, no., pp. 3742-3746 vol.7, 1-5 Dec. 2003.

- [135] Etheridge, J.; Chen, G.; Tanaka, M.; Watanabe, G., "Distributed architecture for cross-domain network management," *IEEE Network Operations and Management Symposium, 1998. NOMS 98.*, vol.2, pp.610-618, 15-20 Feb 1998.
- [136] S. Brugnoli et al., "An Expert System for Real-Time Fault Diagnosis of the Italian Telecommunication Network," *Proc. 3rd Int'l. Symp. Integrated Network Mgmt.*, San Francisco, California, pp. 617-6281, 1993.
- [137] T. Cikosky and J. Whitehill. "Integrated Network Management Systems: Understanding the Basics," *Telecomm.*, vol. 6, no. 6. 1993.