

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación



**Promoviendo la Interoperabilidad Centrada  
en el Humano para la Transformación  
Digital: Estrategias de Integración de Datos  
Industriales con Estándares Web**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Diego Francisco Carvajal Flores**  
Ingeniero en Mecatrónica

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de  
Telecomunicación

**Doctorado en Ingeniería Biomédica**

**Promoviendo la Interoperabilidad Centrada  
en el Humano para la Transformación  
Digital: Estrategias de Integración de Datos  
Industriales con Estándares Web**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Diego Francisco Carvajal Flores**  
Ingeniero en Mecatrónica

Bajo la dirección de:  
Dr. Patricia Abril Jiménez

Madrid, 2024

Título: Promoviendo la Interoperabilidad Centrada en el Humano para la Transformación Digital: Estrategias de Integración de Datos Industriales con Estándares Web

Autor: Diego Francisco Carvajal Flores

Programa de Doctorado: Ingeniería Biomédica

Dirección de Tesis:

Dr. Patricia Abril Jiménez, Profesor Ayudante Doctor, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial - Universidad Politécnica de Madrid (Director)

Revisores Externos:

Tribunal de Tesis:

Fecha de Defensa de Tesis:



*A Dios, mis padres, hermanos y sobrinos*



# Agradecimientos

Mi agradecimiento a Dios por darme la vida y poner en ella a todos a quienes puedo agradecer por acompañarme en este viaje que ha traspasado fronteras terrenas y de pensamiento.

A mis padres, quienes han construido un hogar en el que he recibido mucho amor y las enseñanzas que me han servido en la travesía de la vida, y que en este momento marca un punto especial de finalización de esta etapa académica.

Recuerdo siempre a mis hermanos y sobrinos, quienes han sido mis compañeros incondicionales, siempre brindándome su cariño y apoyo a lo largo de este camino.

Inmensamente agradezco a Patricia, mi directora, por su guía, paciencia y sabiduría, que han sido fundamentales en este proyecto. Su dedicación y experiencia han marcado una gran diferencia en mi crecimiento académico y personal. Rindo homenaje a los coordinadores y compañeros del grupo Life Supporting Technologies de la ETSIT UPM, por el trabajo conjunto y las enseñanzas compartidas, que han sido clave en el desarrollo de este trabajo de investigación.

A mis amigos de toda la vida y a aquellos que, en este último tramo, se han vuelto parte fundamental de mi vida. Su amistad ha sido un refugio y una motivación en los momentos más desafiantes.

# Abstract

This doctoral thesis addresses the challenge of Digital Transformation in industrial environments, with a particular focus on human-centered interoperability. The study explores how interoperability standards, Semantic Web and the Internet of Things (IoT), can facilitate industrial data integration and enhance human-machine collaboration in Industry 5.0.

The main objective of the research is to develop a software component, WoT-IL, that enables smooth communication between heterogeneous devices in industrial settings, overcoming the challenges of semantic interoperability. This component aims not only to improve efficiency and safety in industrial processes but also to integrate workers into digital transformation processes, giving them an active role and ensuring their well-being.

A user-centered methodology was used for the development of WoT-IL, with several iterations involving both laboratory tests and validations in real industrial environments. The results obtained in scenarios such as Arçelik and Bosch confirm that WoT-IL enhances device connectivity, system stability, and interoperability, ensuring data integrity throughout the process.

Additionally, the thesis discusses the impact of Industry 5.0, which emphasizes human-machine collaboration and the creation of more efficient and safer industrial environments. Through the implementation of WoT-IL, it is demonstrated that interoperability standards not only improve productivity but also facilitate the customization of production processes and the sustainability of the industry.

In conclusion, WoT-IL represents a significant step toward overcoming data fragmentation in the industry, facilitating the transition to a more human-centered Industry 5.0, with practical applications that benefit both workers and system developers.

# Resumen

La presente tesis doctoral aborda el desafío de la Transformación Digital en entornos industriales, con un enfoque particular en la interoperabilidad centrada en el ser humano. El estudio explora cómo los estándares de interoperabilidad, la Web Semántica y el Internet de las Cosas (IoT), pueden facilitar la integración de datos industriales y mejorar la colaboración entre humanos y máquinas en la Industria 5.0.

El principal objetivo de la investigación es desarrollar un componente de software, WoT-IL, que permita la comunicación fluida entre dispositivos heterogéneos en entornos industriales, superando los retos de la interoperabilidad semántica. Este componente busca no solo mejorar la eficiencia y la seguridad en los procesos industriales, sino también integrar a los trabajadores en los procesos de transformación digital, dándoles un papel activo y garantizando su bienestar.

Se utilizó una metodología centrada en el usuario para el desarrollo del componente WoT-IL, con varias iteraciones que involucraron tanto pruebas de laboratorio como validaciones en entornos industriales reales. Los resultados obtenidos en escenarios como Arçelik y Bosch confirman que WoT-IL mejora la conectividad entre dispositivos, la estabilidad del sistema y la interoperabilidad, garantizando la integridad de los datos a lo largo del proceso.

Además, la tesis discute el impacto de la Industria 5.0, que enfatiza la colaboración entre humanos y máquinas y la creación de entornos industriales más eficientes y seguros. A través de la implementación de WoT-IL, se demuestra que los estándares de interoperabilidad no solo mejoran la productividad, sino que también facilitan la personalización de los procesos productivos y la sostenibilidad de la industria.

En conclusión, WoT-IL representa un avance significativo hacia la superación de la fragmentación de datos en la industria, facilitando la transición hacia una Industria 5.0 más centrada en el humano, con aplicaciones prácticas que benefician tanto a los trabajadores como a los desarrolladores de sistemas.



# Tabla de Contenido

Agradecimientos . . . . .	v
Abstract . . . . .	vi
Resumen . . . . .	vii
Lista de Figuras . . . . .	xi
Lista de Tablas . . . . .	xiv
Abreviaturas y acrónimos . . . . .	xvi
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación y planteamiento del problema . . . . .	2
1.1.1 Hacia la 4 <sup>a</sup> Revolución Industrial . . . . .	2
1.1.2 Hacia la compartición masiva de datos . . . . .	4
Internet of Things . . . . .	4
Interoperabilidad: Retos y Perspectivas . . . . .	5
1.1.3 Una industria más humana, sostenible y resiliente . . . . .	6
1.1.4 Hacia una transformación digital integradora . . . . .	7
1.2 Marco Teórico . . . . .	8
1.2.1 Industria 4.0 a Industria 5.0 . . . . .	8
Definición y Características de la Industria 4.0 . . . . .	9
Transición y Evolución hacia la Industria 5.0 . . . . .	10
El Enfoque Centrado en el Humano en la Industria 5.0 . . . . .	13
1.2.2 Transformación Digital . . . . .	15
Concepto y Principios de la Transformación Digital . . . . .	16
Impacto de la Transformación Digital en las pymes . . . . .	17
Barreras y Desafíos de la Transformación Digital . . . . .	19
1.2.3 Interoperabilidad Semántica . . . . .	19
Definición de Interoperabilidad e Interoperabilidad Semántica . . . . .	20
Importancia de la Interoperabilidad en la Transformación Digital . . . . .	20
Retos y Estrategias para la Implementación de la Interoperabilidad Semántica . . . . .	22
1.2.4 El estándar <i>Web of Things</i> . . . . .	24
Definición y Principios del WoT . . . . .	24
Aplicaciones y Beneficios del WoT . . . . .	26
WoT en la Industria 5.0 . . . . .	27
1.2.5 Modelos de Arquitectura de Referencia y Estándares Industriales . . . . .	28
Definición y Clasificación de los Estándares Industriales . . . . .	28
Modelos de Arquitectura de Referencia en la Industria . . . . .	29
Importancia y Aplicación de los Estándares Industriales en la Transformación Digital . . . . .	30

1.2.6	FIWARE como arquitectura de referencia para una industria inteligente	30
1.2.7	<i>Open Platform Communications Unified Architecture</i> (OPC UA) . . .	31
1.2.8	Mano de obra, interoperabilidad y transformación: Poniendo al trabajador en el centro . . . . .	32
1.3	Definición y estructura del documento . . . . .	33
<b>2</b>	<b>Hipótesis y Objetivos</b>	<b>35</b>
2.1	Objetivos . . . . .	35
2.1.1	Objetivo General . . . . .	35
2.1.2	Objetivos Específicos . . . . .	35
2.1.3	Hipótesis de la investigación . . . . .	35
2.2	Preguntas de Investigación . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Materiales y métodos</b>	<b>37</b>
3.1	Proyecto SHOP4CF . . . . .	37
3.2	Herramientas para el desarrollo del Componente Semántico . . . . .	39
3.3	Métodos de Desarrollo . . . . .	41
3.3.1	Arquitectura de SHOP4CF . . . . .	41
	Integración de Interfaces de Alto Nivel . . . . .	41
	Posicionamiento de Componentes y Mapeo de Escenarios . . . . .	42
3.3.2	Metodología Centrada en el Usuario ( <i>User-Centered Design</i> , UCD) .	44
3.3.3	Implementación de Metodologías Ágiles en el Desarrollo de WoT-IL	45
3.4	Métodos de Evaluación y Validación . . . . .	46
3.4.1	Herramientas y Metodologías de Evaluación . . . . .	46
	Pruebas de laboratorio . . . . .	46
	Integración y validación en entornos reales . . . . .	47
	Escenario de Validación 1: Arçelik AS Cayirova Kampusu . . . . .	47
	Escenario de Validación 2: Robert Bosch España Fábrica Madrid, S.A.U. . . . .	48
3.4.2	Evaluando la adaptabilidad al humano . . . . .	49
	Marco de Evaluación General de SHOP4CF . . . . .	49
	El Cuestionario de Evaluación de SHOP4CF . . . . .	52
	Método de Evaluación Comparativa . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Desarrollando WoT-IL: Un Enfoque Semántico para Mejorar la Interoperabilidad en la Transformación Digital</b>	<b>55</b>
4.1	Fases de Desarrollo . . . . .	55
4.2	Requisitos del Componente WoT-IL . . . . .	60
4.3	Diseño y Desarrollo de WoT-IL . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Validación y Resultados</b>	<b>67</b>
5.1	Validación Técnica . . . . .	67
5.1.1	Diseño y configuración del entorno de pruebas . . . . .	68
5.1.2	Generación de carga de protocolos IoT . . . . .	69
5.1.3	Plan de Pruebas Técnicas . . . . .	74
5.1.4	Análisis Comparativo de Rendimiento en el Entorno FIWARE Du- rante las Pruebas de Laboratorio . . . . .	74
5.1.5	Análisis de Rendimiento en el Entorno Web of things Durante las Pruebas de Laboratorio . . . . .	78

5.2	Evaluación del Componente WoT-IL en Entornos Reales de los Pilotos de Gran Escala del Proyecto SHOP4CF . . . . .	80
5.2.1	Visión General del Ciclo de Vida del Experimento: Despliegue y Evaluación de Resultados . . . . .	80
	Piloto de Arçelik . . . . .	81
	Piloto de Bosch . . . . .	85
	Comparación entre las soluciones de los casos de uso de Arçelik y Bosch . . . . .	89
	Comparación de Resultados . . . . .	94
	Evaluación y Adopción de WoT-IL en pymes mediante Convocatorias Abiertas del Proyecto SHOP4CF . . . . .	95
<b>6</b>	<b>Discusión y Conclusiones</b>	<b>101</b>
6.1	Discusión . . . . .	102
6.1.1	Interacción entre Hipótesis y Hallazgos . . . . .	103
6.1.2	Implicaciones de la Investigación . . . . .	106
6.2	Conclusiones . . . . .	107
6.2.1	Respuestas a las Preguntas de Investigación . . . . .	107
6.2.2	Reflexiones Finales . . . . .	109
	<b>Referencias</b>	<b>111</b>
	<b>Anexo A: Cuestionario de Evaluación</b>	<b>127</b>
	<b>Anexo B: Resultados del Cuestionario de Factores Humanos</b>	<b>131</b>
	<b>Anexo C: Explicación de la metodología de recogida del valor de referencia de los KPIs</b>	<b>141</b>
	<b>Anexo D: Despliegue y resultados de los pilotos FSTP</b>	<b>145</b>



# Lista de Figuras

1.1	Evolución de la industria. Fuente: (Ibermática, 2023) . . . . .	9
1.2	Principales características de la Industria 4.0. Fuente: Adaptado de (Perales et al., 2018, United Nations Conference on Trade and Development, 2022) .	10
1.3	Transición de Industria 4.0 a 5.0: Enfoque Humano y Sostenible. Fuente: (Mouser Electronics, 2023) . . . . .	12
1.4	De la automatización industrial a la cognitiva. Fuente: Adaptado de (Cucuzza, 2023) . . . . .	14
1.5	Cambio de competencias en EE.UU. y Europa Occidental por categoría, % del tiempo dedicado. Fuente: (Ellingrud et al., 2020) . . . . .	15
1.6	Los ocho principios básicos para escalar la TD. Fuente: (Kiewell et al., 2022)	16
1.7	Beneficios de la interoperabilidad semántica en la TD. . . . .	21
1.8	Beneficios de la interoperabilidad semántica en la TD. . . . .	23
1.9	Principios del WoT . . . . .	25
3.1	Arquitectura lógica de software de alto nivel con interfaces. Fuente: (Zimniewicz et al., 2021) . . . . .	42
3.2	Mapeo de los componentes de SHOP4CF a la arquitectura lógica de software de alto nivel. Fuente: (Zimniewicz et al., 2021) . . . . .	43
3.3	SHOP4CF - Arquitectura lógica de middleware de alto nivel. Fuente: (Zimniewicz et al., 2021) . . . . .	43
3.4	Diagrama del Entorno de Pruebas para la Validación de la Funcionalidad e Interoperabilidad del Componente WoT-IL . . . . .	47
3.5	Marco de evaluación de SHOP4CF (adaptado de los entregables del Paquete de Trabajo 2 de SHOP4CF). Fuente: (Aromaa et al., 2020) . . . . .	50
4.1	Fases del Desarrollo de WoT-IL . . . . .	56
4.2	Arquitectura del componente WoT-IL . . . . .	62
4.3	Relación entre un Nodo OPC UA y una Entidad FIWARE . . . . .	64
4.4	Relación entre un Nodo OPC UA y una WoT “Thing Description” . . . . .	65
5.1	Ejemplo de una Device Entity de FIWARE . . . . .	71
5.2	Ejemplo de una Thing Description . . . . .	73
5.3	WoT-IL: Uso de la CPU (%) . . . . .	75
5.4	F4I OPC UA: Uso de la CPU (%) . . . . .	76
5.5	WoT-IL: Uso de Memoria (%) . . . . .	76
5.6	F4I OPC UA: Uso de Memoria (%) . . . . .	76
5.7	WoT-IL: Datos transmitidos . . . . .	77
5.8	F4I OPC UA: Datos transmitidos . . . . .	77

5.9	Resultados de eficiencia del componente WoT-IL en el entorno Web of Things	79
5.10	Resultados del cuestionario de factores humanos para el caso de uso de Arcelik (Escala: 5 = Excelente; muy bien diseñado; 4 = Bueno; agradable de usar; 3 = Neutro; ni gusta ni disgusta; 2 = Deficiente; se sugiere investigar más, considerar cambios; 1 = Muy deficiente; se necesita investigar más, se deben implementar cambios). Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)	85
5.11	Resultados del cuestionario de factores humanos para el caso de uso de BOSCH (Escala: 5 = Excelente; muy bien diseñado; 4 = Bueno; agradable de usar; 3 = Neutro; ni gusta ni disgusta; 2 = Deficiente; se sugiere investigar más, considerar cambios; 1 = Muy deficiente; se necesita investigar más, se deben implementar cambios). Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)	89
5.12	Resultados del cuestionario de integradores y desarrolladores relacionados con la experiencia de desarrollo e integración. Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)	96
5.13	Resultados del cuestionario de factores humanos para la segunda convocatoria abierta (Escala: 5 = Excelente; 4 = Bueno; 3 = Neutral; 2 = Pobre; 1 = Muy pobre). Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)	97
5.14	Resultados de dos preguntas adicionales (5 = totalmente de acuerdo, 1 = totalmente en desacuerdo). Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)	97
5.15	Resultados del cuestionario de integradores y desarrolladores relacionado con la experiencia de desarrollo e integración. Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)	98
5.16	Resultados del cuestionario de factores humanos para la segunda convocatoria abierta (Escala: 5 = Excelente; 4 = Bueno; 3 = Neutral; 2 = Pobre; 1 = Muy pobre). Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)	99
5.17	Resultados de dos preguntas adicionales (5 = totalmente de acuerdo, 1 = totalmente en desacuerdo). Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)	100

# Lista de Tablas

1.1	Diferencias y similitudes entre la Industria 4.0 y la Industria 5.0. . . . .	13
1.2	Desafíos y Análisis de la Interoperabilidad Semántica . . . . .	22
1.3	Interoperabilidad semántica: desafíos y estrategias de solución . . . . .	24
1.4	Dominios de aplicación del WoT. Fuente: Adaptado de (W3C World Wide Web Consortium, <a href="#">2023b</a> ) . . . . .	27
1.5	Clasificación de los estándares industriales. Fuente: Adaptado de (Grangel-González et al., <a href="#">2017</a> , Suvarna et al., <a href="#">2020</a> , Q. Li et al., <a href="#">2018</a> , Zuehlke, <a href="#">2019</a> , Barleta et al., <a href="#">2020</a> ) . . . . .	29
3.1	Herramientas y Tecnologías Utilizadas . . . . .	40
3.2	Escenarios de evaluación propuestos . . . . .	51
3.3	Categorías de los KPI . . . . .	51
4.1	Desafíos Críticos y Soluciones en la Integración de WoT-IL . . . . .	59
4.2	Requisitos Clave para el Desarrollo de WoT-IL . . . . .	60
5.1	Ejemplos de Nodos OPC UA . . . . .	70
5.2	Resultados comparativos del rendimiento de los componentes WoT-IL y F4I OPC UA bajo cargas de trabajo variadas. . . . .	78
5.3	Resumen de los componentes desplegados y evaluados en el Caso de Uso de Arçelik. Fuente: Adaptada de (Abril-Jimenez et al., <a href="#">2023</a> ). . . . .	81
5.4	KPIs y Valores de Referencia de la evaluación del caso de Uso de Arçelik . . . . .	83
5.5	Resumen de los componentes finalmente desplegados y evaluados en el Caso de Uso de Bosch. Fuente: Adaptada de (Abril-Jimenez et al., <a href="#">2023</a> ) . . . . .	86
5.6	KPIs y Valores de Referencia de la evaluación del Caso de Uso de Bosch. Fuente: (Abril-Jimenez et al., <a href="#">2023</a> ) . . . . .	87
5.7	Caso de Uso de BOSCH . . . . .	91
5.8	Caso de Uso de Arçelik . . . . .	92

## Abreviaturas y acrónimos

- TD** Transformación Digital
- AR** Arquitectura de Referencia
- IoT** *Internet of Things* - Internet de las Cosas
- RFID** (Radio Frequency Identification) - Identificación por Radiofrecuencia
- WoT** *Web of Things* - Web de las Cosas
- OIT** Organización Internacional del Trabajo
- NIOSH** (*National Institute for Occupational Safety and Health*) - Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos
- IA** Inteligencia Artificial
- TIC** Tecnologías de la Información y la Comunicación
- IoP** Internet de las Personas
- ERP** *Enterprise Resource Planning* - Planificación de Recursos Empresariales
- W3C** *World Wide Web Consortium*
- SHOP4CF** *Smart Human Oriented Platform for Connected Factories*
- OPC UA** Open Platform Communications Unified Architecture
- CB** Context Broker
- COBOTS** Robots Colaborativos
- AR** *Augmented Reality* - Realidad Aumentada
- VR** *Virtual Reality* - Realidad Virtual
- MR** *Mixed Reality* - Realidad Mixta
- FG** Facilitadores Genéricos
- WoT-IL** *Web of Things - Interoperability Layer*
- IDE** *Integrated Development Environment* - Entornos de Desarrollo Integrados
- UCD** *User-Centered Design* - Metodología Centrada en el Usuario
- AGV** *Automated Guided Vehicle* - Plataforma Móvil Automatizada
- KPI** *Key Performance Indicator* - Indicador Clave de Desempeño
- VM** *Virtual Machine* - Máquina Virtual

**SUS** *System Usability Scale* - Escala de Usabilidad del Sistema

**AI** *Alignment Index* - Índices de Alineación

**HRI** *Human Resource Investment* - Inversión en Recursos Humanos

**PBI** *Perceived Benefit Index* - Beneficio Percibido

**FSTP** *Financial Support for Third Parties* - Apoyo Financiero para Terceras Partes



# Capítulo 1

## Introducción

La presente tesis doctoral se enfoca en abordar la complejidad de la transformación digital (TD) de los sistemas industriales a raíz de la 4<sup>o</sup> Revolución Industrial y su continuación con el recientemente creado, paradigma de la Industria 5.0 (Leng et al., 2022). La TD se refiere a la integración de tecnologías digitales en todas las áreas de una empresa, cambiando fundamentalmente cómo opera y aporta valor a sus clientes (Moghrabi et al., 2023). En el paradigma de la Industria 5.0, además, pretende que estos cambios mejoren la calidad de vida del trabajador, dándole un papel más activo en los mismos. Así, esta tesis procura poner el foco en favorecer una interoperabilidad de datos que al vez que impulse la TD, lo haga de una forma más humana, esto es, favoreciendo a los trabajadores en ejercicio de sus funciones, desde el punto de vista de su salud y bienestar (Ghobakhloo et al., 2024).

En el contexto de la Industria 4.0, entendemos como interoperabilidad a la capacidad de los sistemas y componentes tecnológicos para comunicarse, intercambiar datos y utilizar la información que ha sido compartida de manera eficiente y efectiva, facilitando así la colaboración fluida entre diferentes plataformas y entidades (Hafidi et al., 2023). La relevancia del enfoque de esta tesis sobre esta visión tradicional de la interoperabilidad radica en su potencial para usar los datos y un fluido intercambio de los mismos en creación de una industria donde las personas y su bienestar esté en el centro. El objetivo es no sólo promover una respuesta ágil y coordinada a los retos globales actuales, sino promover la sostenibilidad y la innovación dentro del sector industrial (Commission et al., 2020a) usando la fuerza creativa de sus trabajadores. Para ello, se contemplan las limitaciones existentes en el proceso de digitalización industrial actual, las estrategias de transformación adoptadas en los distintos sectores industriales, los estándares de interoperabilidad que se han adoptado en estos procesos, por ejemplo, Web Semántica y las metodologías e implementaciones que promueven la generación de servicios de colaboración entre humanos y máquinas. De este modo, se busca otorgar un rol central a los trabajadores industriales en los procesos de transformación digital, evitándoles tareas repetitivas y de bajo valor, para centrarse en tareas de mayor valor añadido, mejorando su experiencia laboral y fomentando un entorno industrial más eficiente, seguro y resiliente.

En este capítulo introductorio, se presentará la motivación, el contexto y el planteamiento del problema que impulsan la investigación, así como el marco teórico que fundamenta el desarrollo de este trabajo. También se proporcionará una visión general de la estructura de la tesis doctoral, detallando los diferentes temas que serán abordados en los capítulos subsiguientes.

## 1.1 Motivación y planteamiento del problema

### 1.1.1 Hacia la 4<sup>a</sup> Revolución Industrial

La 4<sup>a</sup> Revolución Industrial, también conocida como Industria 4.0, es una transformación sin precedentes que fusiona el mundo físico y digital y la forma en la que el trabajador se relaciona con el medio de producción (Schwab, 2017). Este cambio ha dado lugar a sistemas de producción inteligentes y altamente adaptativos, marcando un importante paso hacia la digitalización e interconexión de sistemas en diversos sectores industriales (Lasi et al., 2014). Esta transición no solo permite la automatización de procesos, sino que también facilita la interacción y el intercambio de información en tiempo real entre diferentes elementos del sistema, optimizando así la eficiencia y flexibilidad de las operaciones industriales (Keleko et al., 2022). Esto ha abierto el camino para que las empresas exploren nuevas formas de creación de valor, optimicen sus operaciones y, finalmente, se vuelvan más resilientes en un entorno empresarial cada vez más volátil (Kiel et al., 2017). Sin embargo, esta revolución no es solo una cuestión de tecnología, sino también de perspectiva y enfoque (Meindl et al., 2021).

Históricamente, las grandes corporaciones han liderado el camino en la adopción de las tecnologías digitales, teniendo a su disposición recursos suficientes y capacidad para adaptarse a las transformaciones del mercado. En contraposición, las pymes afrontan mayores dificultades para adoptar la TD debido a limitaciones de recursos y la necesidad de adaptaciones específicas (Elbeltagi et al., 2013).

Tras las crisis encadenadas desde principio de esta década y con los grandes retos sociales, ambientales y económicos que afrontamos, Europa está promoviendo una transición ecológica y digital en todos sus sectores económicos, preparándose para crisis futuras y aspirando a una sociedad y economía más sostenibles y resilientes (Commission et al., 2020b, Mentis, 2023). Sin embargo, pese a que las tecnologías digitales, se ha convertido en un conductor fundamental para estas nuevas políticas, numerosas pymes se ven limitadas en su transformación, precisamente, por sus necesidades de digitalización, encontrando dificultades para hacer frente a los desafíos de la TD, en particular en lo que respecta a aspectos medioambientales, sociales y económicos (Lieder y Rashid, 2016, Vrontis et al., 2022, Martínez-Peláez et al., 2024).

Para permitir una transformación proactiva y ayudar a estas pymes a coexistir con las tendencias sociales, económicas y tecnologías emergentes, es imprescindible proporcionar condiciones que faciliten la transformación de sus modelos de producción de manera sencilla y asequible. Durante la última década, las investigaciones se han centrado en el desarrollo de Modelos de Arquitectura de Referencia (AR) para facilitar la adopción de la TD y las tecnologías emergentes dentro del paradigma del *Internet of Things* (IoT) (Nakagawa et al., 2021). Estos modelos han sido cruciales en proporcionar un marco estándar para la integración y gestión de tecnologías digitales en entornos industriales.

A pesar de los avances significativos, la implementación de estos modelos de AR en la práctica ha enfrentado importantes obstáculos. Las pymes, en particular, se encuentran con desafíos debido a la especialización y limitación de los AR a ámbitos específicos, lo que restringe su aplicación en entornos con necesidades dinámicas y variadas. Además, la ausencia de un marco integral que se adapte a la naturaleza cambiante, al contexto sectorial y a las necesidades únicas de cada empresa ha sido un impedimento considerable (Sabando-Vera et al., 2022). Esta situación ha fomentado el desarrollo de plataformas

abiertas, que pueden ampliarse mediante el uso de componentes y conectores adicionales. Estas plataformas permiten la creación de aplicaciones inteligentes basadas en el análisis de datos, ofreciendo una solución flexible y escalable. Esta adaptabilidad es fundamental para superar los diversos desafíos y necesidades que las pymes enfrentan en su proceso de transformación digital.

Los modelos de AR abiertos han jugado un papel esencial en la eliminación de las barreras existentes para la adopción de nuevas tecnologías y plataformas, facilitando la integración de las pequeñas empresas en el panorama de la TD y promoviendo la revolución social que transforma e integra las prioridades de sostenibilidad (Carayannis y Morawska-Jancelewicz, 2022, Shabur, 2024).

No obstante, las pymes son actores significativos en la economía europea y aún necesitan apoyo para transformar sus operaciones e implementar con éxito estrategias de TD (Rupeika-Apoga et al., 2022, Saeedikiya et al., 2024). La diversidad de los sistemas desplegados en distintas empresas y fábricas demanda la existencia de adaptadores de sistema universales que simplifiquen los requerimientos de interoperabilidad entre el software de la fábrica, los datos y la plataforma, y otros adaptadores de sistemas externos (Danneels y Viaene, 2022, Qi et al., 2024).

Uno de los principales activos de las pymes son sus trabajadores, quienes desempeñan un papel crucial en la adaptabilidad y resiliencia de estas empresas ante los desafíos del mercado. Sin embargo, las pymes a menudo enfrentan dificultades significativas para formar a sus trabajadores, especialmente en competencias digitales avanzadas, debido a limitaciones de recursos y acceso a formación especializada (Mer y Virdi, 2024). Esta situación se complica aún más por la necesidad de que los trabajadores sean multitarea, adaptándose rápidamente a diversas funciones dentro de la empresa sin la especialización profunda que podrían ofrecer los empleados en organizaciones más grandes (Alliance, 2021).

Además, las barreras para la implementación de la TD en las pymes no son solo técnicas y operacionales, sino también personales. La resistencia al cambio es un factor considerable, ya que la introducción de nuevas tecnologías puede generar incertidumbre entre los trabajadores acerca de la seguridad de sus empleos y el desarrollo de nuevas habilidades (Galunic, 2020). La adaptación a la TD requiere, por lo tanto, no solo inversiones en tecnología, sino también en el desarrollo humano, incluyendo formación y re-calificación de los empleados para asegurar su participación activa y comprometida en el proceso de transformación (Denning, 2023).

En este contexto, es esencial que las pymes adopten enfoques centrados en el humano para la Transformación Digital, donde se priorice el desarrollo de capacidades de los trabajadores junto con la implementación tecnológica. Esto implica hacer que la tecnología y la compartición de datos sean más sencillas y accesibles, adaptándose a las necesidades específicas de las pymes y sus trabajadores. Al hacerlo, las pymes pueden superar las barreras personales y organizacionales para la TD, facilitando una transición más fluida y efectiva hacia modelos de negocio digitalmente avanzados y centrados en el humano (Ragazou et al., 2022).

La implementación de una Transformación Digital (TD) centrada en las personas ofrece una solución valiosa a estos desafíos, promoviendo un cambio de paradigma en la industria hacia la sostenibilidad y la resiliencia. Sin embargo, se necesita una mayor investigación y

desarrollo para garantizar su efectividad y adaptabilidad en diferentes contextos y sectores (Terhoeven et al., 2022). En este sentido, es fundamental centrarse en las pymes, que representan una oportunidad ideal para encaminar la transformación hacia un enfoque centrado en el ser humano, teniendo en cuenta los desafíos específicos que enfrentan (D. Li et al., 2019)), y donde la compartición efectiva de datos juega un rol fundamental.

### 1.1.2 Hacia la compartición masiva de datos

Como se mencionó en la sección 1.1.1, la Industria 4.0 se caracteriza por la interconexión sin precedentes de dispositivos y sistemas, en el centro de la cual se encuentra el IoT (Kalsoom et al., 2021).

El IoT es una tecnología que agrupa e interconecta dispositivos y objetos inteligentes a través de una red. Los dispositivos y objetos pueden variar enormemente, incluyendo desde sensores y dispositivos mecánicos hasta objetos de la vida cotidiana como una nevera o una bombilla (Al-Fuqaha et al., 2015). Es la visibilidad, la interacción y el intercambio de datos entre estos elementos lo que permite la optimización de los procesos industriales y, a su vez, genera una amplia gama de productos útiles en diversos contextos, desde las ciudades hasta el hogar, la industria, el ocio y los servicios de salud (Machorro-Cano et al., 2019).

No obstante, aunque el crecimiento y el potencial de la IoT son impresionantes, su adopción y desarrollo plenos se ven obstaculizados por ciertos desafíos. Uno de los principales es la fragmentación en los estándares de comunicación y la falta de interoperabilidad entre los sistemas propietarios (Aly et al., 2018). La ausencia de consensos entre los desarrolladores de sistemas propietarios dificulta la integración de diferentes tecnologías y enfoques adoptados por diversas empresas, lo cual implica altos costos y recursos invertidos en lograr la interoperabilidad (Simeoni et al., 2021).

Para superar estos desafíos, se han propuesto varias aproximaciones y estrategias. A continuación, se explorarán en detalle las diferentes perspectivas y enfoques sobre la interoperabilidad en el contexto del IoT, analizando tanto los retos existentes como las posibles soluciones. En particular, se discutirán aspectos relacionados con el Internet of Things y una evaluación de los obstáculos para la interoperabilidad en la Industria 4.0 y las posibles estrategias para superarlos.

#### Internet of Things

El IoT, a pesar de ser una tecnología contemporánea, tiene sus raíces en la intersección de múltiples áreas de estudio y práctica a lo largo de varias décadas (J. Wang et al., 2021). Esta tecnología revolucionaria se originó en el siglo pasado con el advenimiento de los sistemas de cómputo y las redes de comunicación (Jun et al., 2011).

En los años 60 y 70, los primeros experimentos en la interconexión de sistemas informáticos a través de las redes precursoras del Internet, como ARPANET, pusieron la piedra angular para lo que posteriormente se convertiría en el IoT (Kleinrock, 2003). Estas primeras redes de ordenadores establecieron la idea de que los dispositivos podrían comunicarse entre sí de manera remota y distribuida (Hoske, 2014).

La idea de los objetos cotidianos interconectados en una red, un concepto esencial del IoT, se desarrolló principalmente en la década de 1990. Uno de los primeros ejemplos de un

objeto cotidiano conectado a Internet fue una tostadora controlada a través de una red en la Interop Conference de 1990 (Romkey, 2017). Aunque el concepto estaba presente, el término *Internet of Things* no se acuñó hasta 1999 por Kevin Ashton en el Auto-ID Center del MIT, donde se exploraban las posibilidades de la identificación por radiofrecuencia (RFID) y otras tecnologías de detección para la conectividad masiva (Ashton, 2009).

En la década de los 2000, con la adopción masiva del Internet y el crecimiento de la banda ancha, el IoT comenzó a tomar forma en un sentido más práctico. Las innovaciones en tecnología inalámbrica y en sensores miniaturizados y asequibles hicieron posible la conectividad entre los dispositivos cotidianos (Yan et al., 2015). El IoT se convirtió en una realidad viable gracias a la proliferación de dispositivos móviles, la expansión de las redes de banda ancha y la evolución de las tecnologías de la nube y de los sensores (J. Wang et al., 2021).

Hoy en día, el IoT es un ecosistema en rápido crecimiento que abarca una variedad de dispositivos y sistemas que van desde los electrodomésticos hasta los sistemas de fabricación industrial (N. Sharma et al., 2019). Sin embargo, a pesar de su rápido crecimiento, la adopción y el desarrollo del IoT se ven obstaculizados por desafíos como la fragmentación de los estándares de comunicación y la falta de interoperabilidad entre los sistemas propietarios, como se mencionó anteriormente (Simeoni et al., 2021).

### Interoperabilidad: Retos y Perspectivas

La interoperabilidad se refiere a la habilidad de los sistemas y organizaciones para trabajar juntos, o "interoperar" (Wegner, 1996). En el contexto de la Industria 4.0, la interoperabilidad es esencial para permitir la comunicación y cooperación eficientes entre diversas tecnologías, plataformas y dispositivos (Burns et al., 2019). La idea es que los distintos sistemas, aunque sean de diferentes fabricantes, puedan comprender y procesar los datos entre ellos, lo que conlleva un flujo de trabajo más eficiente y productivo (Chen y Doumeingts, 2003).

Sin embargo, la interoperabilidad ha demostrado ser un desafío considerable en la implementación efectiva de soluciones de IoT. Los problemas radican principalmente en la gran diversidad de estándares y protocolos de comunicación existentes, cada uno desarrollado y promovido por diferentes organizaciones o grupos de interés, lo que dificulta la compatibilidad entre sistemas (Simeoni et al., 2021). Además, los proveedores de tecnología suelen diseñar sus productos para operar en sus propios ecosistemas, lo que resulta en soluciones propietarias que no se integran fácilmente con otros sistemas o dispositivos (Desai et al., 2015).

La falta de un consenso amplio en torno a un conjunto común de estándares y protocolos ha llevado a la fragmentación de la industria, lo que implica altos costos y recursos invertidos en lograr la interoperabilidad (Sezer et al., 2015). Además, este problema se ve exacerbado por problemas de seguridad, ya que los datos transmitidos a través de redes y plataformas heterogéneas pueden ser vulnerables a violaciones de seguridad si no se toman las precauciones adecuadas (Lee et al., 2021).

La búsqueda de soluciones para estos desafíos ha impulsado la investigación y desarrollo en el campo de la interoperabilidad, centrada en la creación de arquitecturas, protocolos y estándares de comunicación que sean universales, seguros y eficientes (Burns et al., 2019). Algunos enfoques proponen la creación de adaptadores universales, arquitecturas de *middleware* y plataformas abiertas que pueden proporcionar una solución a estos desafíos

(Riley, 2020). Sin embargo, la búsqueda de la interoperabilidad total sigue siendo un objetivo a largo plazo, y las soluciones actuales pueden no ser suficientes para satisfacer las necesidades únicas de las pymes en su camino hacia la transformación digital (X. V. Wang et al., 2018).

En definitiva, la interoperabilidad es un elemento fundamental para el éxito de la Industria 4.0 y la masiva compartición de datos. Su logro efectivo puede marcar una diferencia significativa en la forma en que las organizaciones interactúan con la tecnología y entre sí, abriendo nuevas posibilidades para la innovación y la eficiencia (Zeid et al., 2019). A pesar de los desafíos existentes, el progreso en este campo sigue siendo prometedor y es crucial para el avance de la digitalización de las pymes (X. V. Wang et al., 2018).

### 1.1.3 Una industria más humana, sostenible y resiliente

En un contexto marcado por la incursión del IoT y las transformaciones digitales en nuestra vida cotidiana, la necesidad de abordar los desafíos de interoperabilidad se vuelve más apremiante. La Industria 4.0 ha introducido avances significativos en conectividad y digitalización, pero también ha resaltado problemas de fragmentación y barreras para una interoperabilidad efectiva (European Commission, 2021). Frente a esto, emerge la visión de la Industria 5.0, que no solo aspira a superar estos obstáculos sino también a promover una integración más armónica entre la tecnología y el factor humano en los entornos industriales y de fabricación (Alves et al., 2023).

La Industria 5.0 busca superar los desafíos de la fragmentación en la compartición de datos y procesos y promover la interoperabilidad en el ámbito de la industria y la fabricación. Asimismo, combina la conectividad y la digitalización del IoT con los principios de la fabricación inteligente, la colaboración humano-máquina y la producción personalizada (Leng et al., 2022). Se trata de una evolución de la Industria 4.0, en la que se busca integrar la capacidad de adaptación y personalización de la producción en masa con la flexibilidad y la participación activa de los trabajadores en los procesos productivos. El enfoque de la Industria 5.0 reconoce la necesidad de un equilibrio entre la tecnología y las consideraciones humanas, fomentando la colaboración y el desarrollo sostenible en diferentes sectores y dominios de aplicación (Ben Youssef y Mejri, 2023).

Además, motivada por los desafíos globales experimentados en años recientes incluyendo el escenario tras la pandemia y la creciente incertidumbre de la economía mundial, la expansión significativa de la digitalización ha ejercido un impacto notable en todos los sectores económicos. Desde la industria manufacturera hasta la agricultura, el diseño de las ciudades y la vida cotidiana de los ciudadanos se han visto transformados por este fenómeno (Bai et al., 2021), con consecuencias particularmente graves en las pymes (Belitski et al., 2022, Haleem et al., 2024). Esta TD evoluciona con una serie de nuevas soluciones y herramientas que ofrecen una amplia gama de ventajas competitivas, incluyendo mejoras en la productividad y rentabilidad, así como la adaptación a las nuevas cadenas de valor y demandas de los clientes. Sin embargo, estos avances han llevado a cambios significativos en las organizaciones y empresas, ya que se han tenido que introducir nuevos procesos que afectan los flujos de trabajo establecidos y la forma tradicional en que la fuerza laboral lleva a cabo los negocios y realiza tareas (Kraus et al., 2021, Dodd et al., 2024).

### 1.1.4 Hacia una transformación digital integradora

Las tecnologías digitales, como el IoT, poseen el potencial de agilizar la adopción del paradigma de la TD, gracias al acceso sencillo a grandes volúmenes de datos y la conversión de estos en conocimiento valioso para la toma de decisiones eficaz. De hecho, la tecnología IoT y los estándares que la engloban son capaces de habilitar el almacenamiento, análisis y transformación de los datos generados en la empresa, así como la utilización de fuentes externas. Esto ofrece la ventaja de posibilitar la integración de objetos inteligentes de manera económica y la explotación de recursos informativos y servicios en la Web (Pflaum y Gölzer, 2018).

A pesar de los avances y las propuestas existentes, la idoneidad de las AR actuales en este aspecto no ha sido adecuadamente investigada. Se observa la ausencia de un proceso de referencia para la TD que facilite la identificación, especificación e implementación de soluciones IoT acordes con los protocolos personalizados vigentes, tales como OPC UA, MQTT, XML, entre otros. Este escenario plantea desafíos significativos para la adopción de enfoques estratégicos por parte de las pymes, al añadir complejidad a la incorporación de procesos digitalizados que potencien la viabilidad, sostenibilidad y eficiencia de las pequeñas y medianas empresas industriales (Wollschlaeger et al., 2017).

Además, es imprescindible tener en cuenta las necesidades específicas de cada empresa y brindarles apoyo para superar las barreras inherentes a la TD. En este sentido, surge una necesidad clara de proponer un enfoque novedoso que permita comprender cómo podría personalizarse la AR para facilitar la traducción automática de un modelo de datos genérico, empleado en una diversidad de sensores y dispositivos IoT, hacia otro propio de procesos específicos de fábricas inteligentes (Nahavandi, 2019). En este panorama, el estándar *Web of Things* (WoT) se presenta como una solución prometedora, con el objetivo de mitigar la falta de interoperabilidad, superar la fragmentación mediante interoperabilidad semántica, facilitar la composición de servicios y permitir un uso seguro de los datos compartidos (Simeoni et al., 2021).

Asimismo, los desafíos que enfrentan los trabajadores en la industria son multifacéticos y complejos. Según la Organización Internacional del Trabajo (OIT), 2,78 millones de trabajadores mueren cada año por enfermedades relacionadas con el trabajo y accidentes, y muchos más sufren lesiones graves y enfermedades no mortales (García-Gámez, 2021). Por otro lado, el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de Estados Unidos ha identificado a los trabajadores de la manufactura como un grupo particularmente en riesgo de trastornos musculoesqueléticos, los cuales pueden ser exacerbados por tareas repetitivas y esfuerzos físicos intensos comunes en estos entornos (Neu-Baker et al., 2022).

Además, la incorporación de tecnologías avanzadas en el paradigma de la industria 4.0, aunque ha llevado a un aumento en la eficiencia de producción, también ha suscitado preocupaciones sobre el aumento del estrés laboral, la disminución de la satisfacción laboral y la potencial pérdida de empleos debido a la automatización (Brougham y Haar, 2018).

En base a lo expuesto anteriormente, es evidente la existencia de un vacío significativo en la literatura y en las soluciones prácticas actuales con respecto a la facilitación de la interoperabilidad y la TD en las pymes, en especial en la adopción del paradigma IoT. Este escenario pone de manifiesto la necesidad imperante de desarrollar un enfoque estandarizado, versátil y adaptable que permita superar las barreras técnicas y organizativas en la implementación de soluciones IoT, además de facilitar la interoperabilidad entre

distintos modelos de datos y marcos de trabajo. En este sentido, la implementación de un componente de software basado en el estándar WoT surge como una propuesta prometedora para abordar estos desafíos, permitiendo la integración efectiva y eficiente de diversas tecnologías y protocolos en el entorno industrial. Por consiguiente, este trabajo se centrará en la investigación y el desarrollo de dicho componente, con el objetivo final de contribuir a la TD de las pymes y fomentar la transición hacia la Industria 5.0, caracterizada por su enfoque humano y colaborativo.

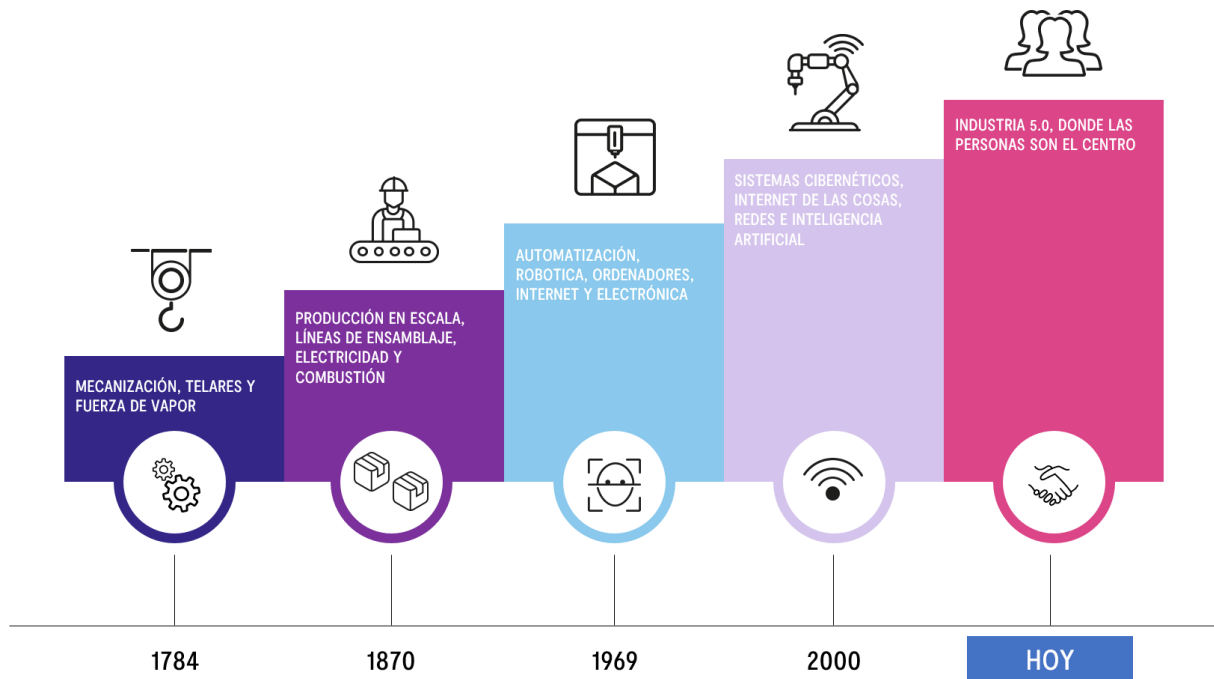
## 1.2 Marco Teórico

La sección del Marco Teórico profundiza en los conceptos clave y las teorías que fundamentan el enfoque de esta tesis doctoral, proporcionando una base sólida para el desarrollo de la propuesta de la solución. Inicialmente, se proporciona una revisión comprensiva de la Transformación Digital y su importancia para las pymes en el contexto europeo actual. A continuación, se detallan las tecnologías emergentes, como el IoT, su potencial en la facilitación de la TD, y los desafíos inherentes a su adopción. Se discute también la importancia de la interoperabilidad y se examinan las soluciones existentes, prestando especial atención al estándar WoT. Finalmente, se explora el papel de los Modelos de AR en la promoción de la adopción de nuevas tecnologías y en la superación de las barreras técnicas.

### 1.2.1 Industria 4.0 a Industria 5.0

La era de la Industria 4.0 representó un cambio paradigmático en las prácticas organizacionales, evidenciado por la implementación masiva del IoT, Inteligencia Artificial (IA), y las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) (Lu, 2017). Aun así, la emergente Industria 5.0 incorpora un enfoque adicional hacia la integración de la participación humana y la colaboración en los procesos de producción. Este movimiento busca establecer un equilibrio entre la automatización y la toma de decisiones humanas, ofreciendo un potencial sin precedentes para la personalización y mejora de la eficiencia mediante una colaboración más estrecha entre humanos y máquinas. Dentro de este contexto, la interoperabilidad semántica se convierte en un factor esencial, facilitando la integración efectiva de diversos componentes y sistemas (Zhong et al., 2017, Atieh et al., 2023).

A continuación, la Figura 1.1 ilustra la evolución de las revoluciones industriales desde la Industria 1.0 hasta la Industria 5.0. La primera revolución industrial se caracterizó por la mecanización y el uso de máquinas de vapor. La siguiente revolución introdujo la producción en masa y la electricidad. La Industria 3.0 marcó la llegada de los ordenadores y la automatización. La Industria 4.0 llevó la automatización a un nuevo nivel con la introducción del IoT, la IA y las TIC (A. Sharma y Singh, 2020, Tabim et al., 2021). Actualmente, la Industria 5.0, pone énfasis en la colaboración entre humanos y máquinas, la personalización y la mejora de las condiciones de trabajo (X. Xu et al., 2021).



**Figura 1.1:** Evolución de la industria. Fuente: (Ibermática, 2023)

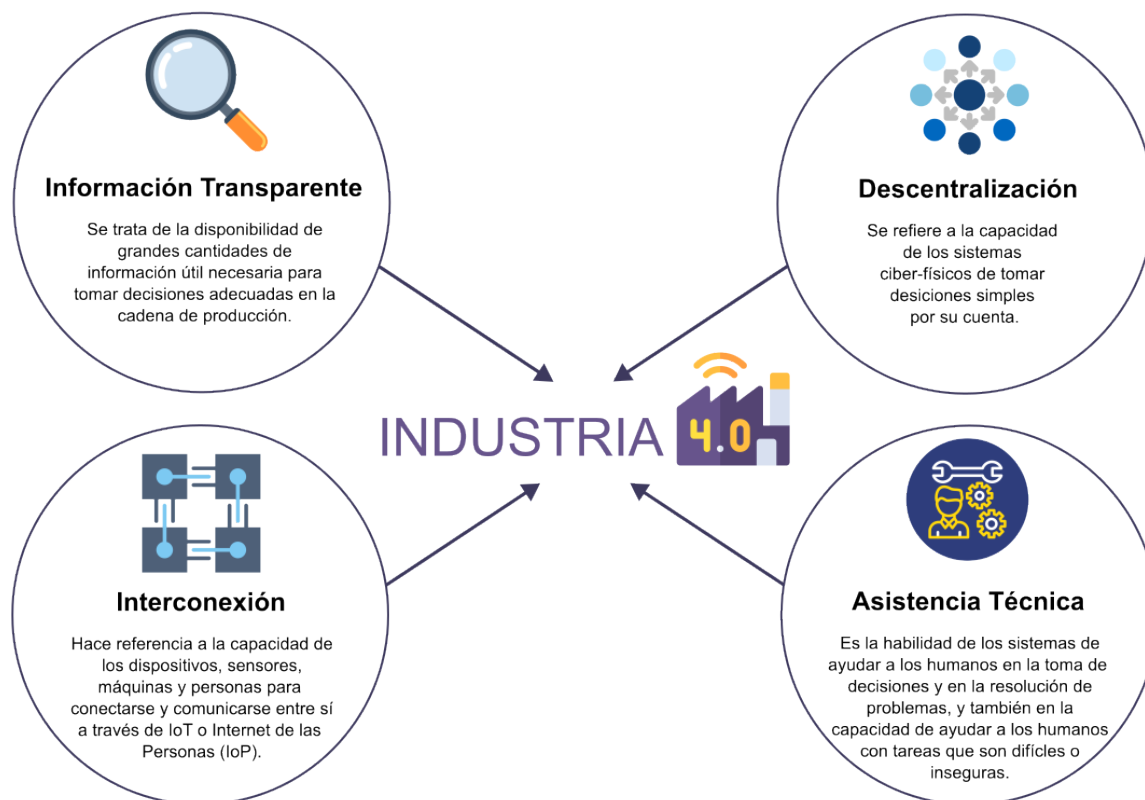
El gráfico (Figura 1.1) proporciona una vista panorámica de cómo cada revolución industrial ha agregado nuevas dimensiones a la fabricación, destacando la creciente importancia del factor humano en la Industria 5.0. Este cambio enfatiza la necesidad de una transición suave y efectiva hacia un entorno más centrado en el humano.

Posteriormente, este trabajo explorará cómo la transición de la Industria 4.0 a la Industria 5.0 está moldeando el futuro de las pymes, y cómo la propuesta de esta investigación apoya este viaje hacia una fabricación más centrada en el humano y personalizada.

## Definición y Características de la Industria 4.0

La Industria 4.0, a menudo referida como la cuarta revolución industrial, juega un papel crucial en la organización y control del ciclo de vida completo de los productos dentro de la industria manufacturera. Esta revolución se distingue por la integración de las TIC con la producción física, fortaleciendo de esta manera la automatización y la interconexión en la industria manufacturera (Kagermann et al., 2013). Es un enfoque que incorpora elementos como la ciber-física y los sistemas embebidos, que permiten que las máquinas, los almacenes, y los sistemas de producción se comuniquen entre sí a través del IoT para hacer posible la producción inteligente (Roy, 2020).

La Figura 1.2 proporciona una visión general de las características fundamentales de la Industria 4.0 y su interacción mutua (Liao et al., 2017, Perales et al., 2018). En el camino hacia la conceptualización de la Industria 5.0, es vital entender estas características, y evaluar su capacidad de mejora o adaptación para promover una colaboración más intensa entre humanos y máquinas.



**Figura 1.2:** Principales características de la Industria 4.0. Fuente: Adaptado de (Perales et al., 2018, United Nations Conference on Trade and Development, 2022)

### Transición y Evolución hacia la Industria 5.0

El concepto de Industria 5.0 surge del análisis crítico de la Industria 4.0, la cual se originó en Alemania en 2011 como parte de su estrategia de alta tecnología. La visión inicial de la Industria 4.0 buscaba establecer mayor eficiencia y flexibilidad en la producción a través de la digitalización y la aplicación de tecnologías impulsadas por la inteligencia artificial. A lo largo del tiempo, sin embargo, este enfoque ha desviado su atención de los principios originales de equidad social y sostenibilidad (Kagermann et al., 2013).

La Industria 5.0, por otro lado, se presenta como una evolución de la Industria 4.0, reafirmando la importancia de la investigación y la innovación para beneficio a largo plazo de la sociedad. La aspiración es lograr una industria centrada en el humano que cumpla con los requisitos económicos y ecológicos, permitiendo una producción más verde y eficiente. Esta visión de una industria más sostenible y centrada en el humano ha sido impulsada por la Comisión Europea y la Dirección General de Investigación e Innovación (Commission et al., 2021).

Este cambio hacia un enfoque más humano en la producción industrial no se limita a Europa. Ha influido en iniciativas a nivel mundial, como "*Made in China 2025*", que busca revitalizar la industria manufacturera china y lograr una transición armoniosa a una nueva era de producción centrada en el humano y sostenible (Wübbecke et al., 2016).

La Figura 1.3 muestra la evolución de la Industria 4.0 a la Industria 5.0, evidenciando los elementos clave que definen cada fase y cómo estos interactúan para configurar un nuevo

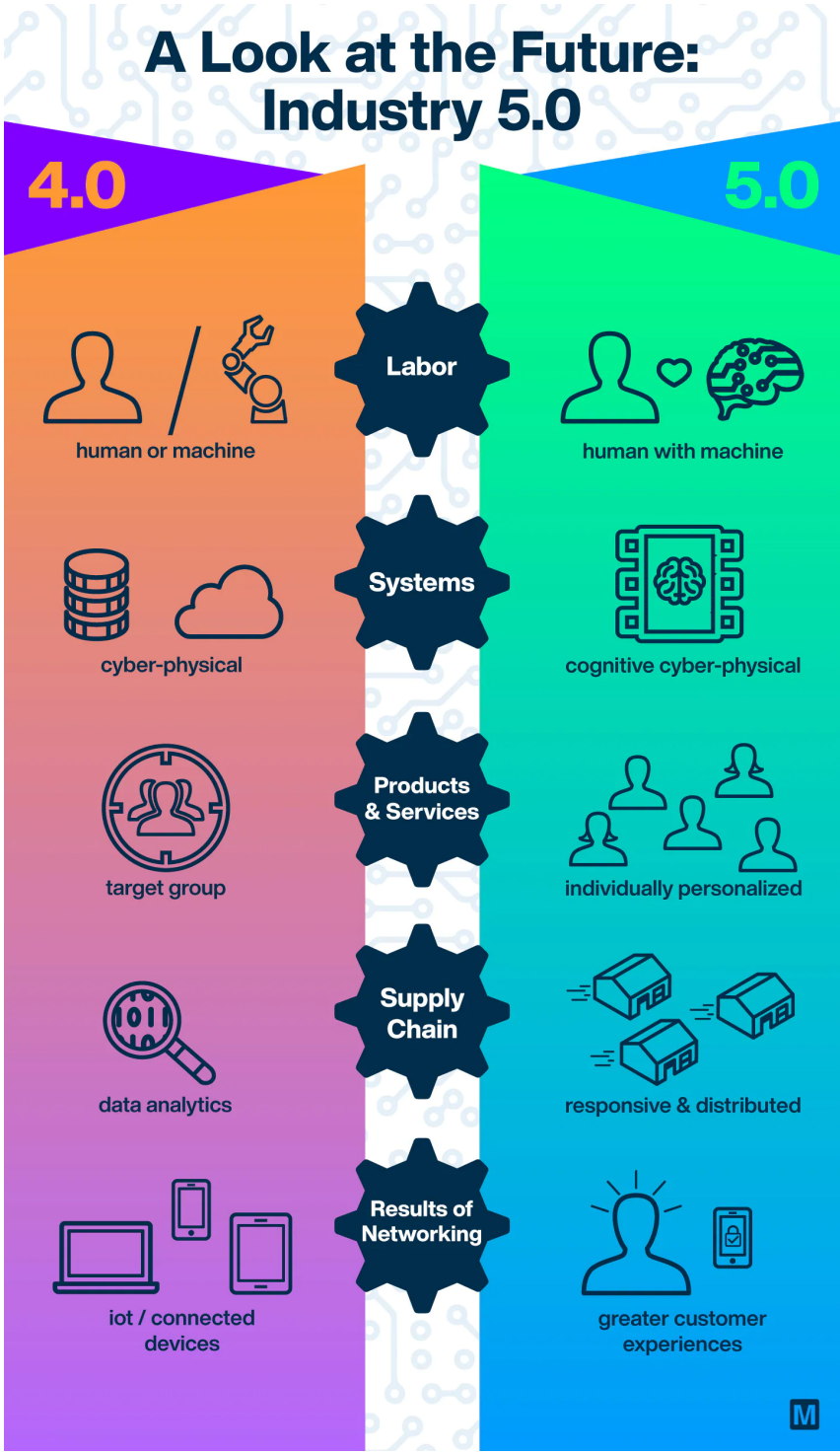
paradigma de producción.

En términos laborales, la Industria 4.0 se caracterizó por la automatización de tareas, mientras que la Industria 5.0 aspira a una colaboración más estrecha entre humanos y máquinas (Hibbert, 2020). En lo que respecta a los sistemas, la Industria 4.0 introdujo sistemas de producción inteligentes, y la Industria 5.0 se centra en mejorar su interoperabilidad y flexibilidad (X. Xu et al., 2021).

En el ámbito de productos y servicios, la Industria 5.0 enfatiza en la personalización y adaptabilidad, aprovechando las tecnologías digitales instauradas en la Industria 4.0 (Saniuk et al., 2022). Con respecto a la cadena de suministro, la transición de la Industria 4.0 a la 5.0 implica un cambio desde una gestión centralizada hacia un sistema más descentralizado y colaborativo (Jafari et al., 2022).

Por último, en el marco de la Industria 5.0, los resultados del networking se optimizan gracias a una mayor integración de tecnologías digitales y la adopción de prácticas de fabricación más sostenibles y eficientes (Yin y Yu, 2022). Además, la Industria 5.0 pone un gran énfasis en la mejora de la experiencia del consumidor. La conexión más estrecha entre la producción y el consumidor, proporcionada por las tecnologías digitales, permite personalizar los productos y servicios según las necesidades y preferencias específicas del cliente, lo que resulta en una experiencia de usuario significativamente mejorada (Barata y Kayser, 2023).

La Tabla 1.1 resume las diferencias y similitudes clave entre la Industria 4.0 y la Industria 5.0. Destaca las variaciones en producción, interacción humano-máquina, productos y servicios, gestión de la cadena de suministro y networking. Así, permite una rápida comparación de los dos paradigmas industriales y su evolución hacia un enfoque más humano y sostenible.



**Figura 1.3:** Transición de Industria 4.0 a 5.0: Enfoque Humano y Sostenible. Fuente: (Mouser Electronics, 2023)

**Tabla 1.1:** Diferencias y similitudes entre la Industria 4.0 y la Industria 5.0.

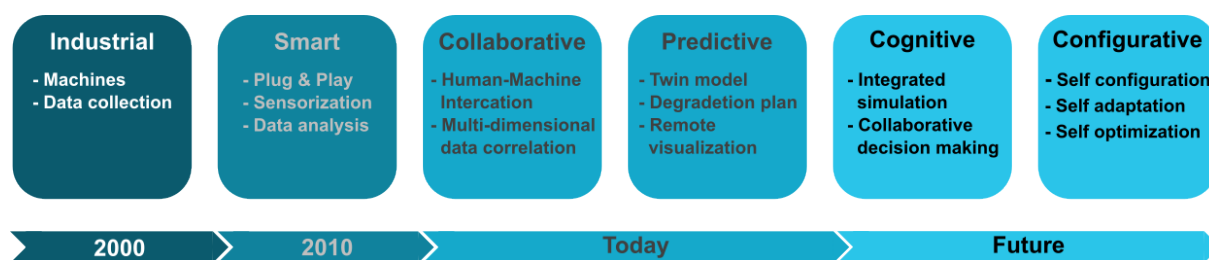
Aspectos	Industria 4.0	Industria 5.0
<b>Producción</b>	Introdujo sistemas de producción inteligentes que mejoraron la eficiencia y la flexibilidad de los procesos industriales.	Se centra en mejorar la interoperabilidad y la flexibilidad de los sistemas de producción, enfatizando la adaptabilidad y la personalización.
<b>Trabajo</b>	Se caracteriza por la automatización de tareas, reduciendo la necesidad de intervención humana en muchas áreas.	Aspira a una colaboración más estrecha entre humanos y máquinas, integrando la inteligencia humana con la eficiencia de las máquinas.
<b>Productos</b>	La producción en masa es una característica clave, apoyada por la digitalización y la automatización.	Enfatiza en la personalización y la adaptabilidad de productos y servicios, atendiendo a las necesidades y preferencias individuales de los consumidores.
<b>Suministro</b>	La gestión de la cadena de suministro es principalmente centralizada, con un control riguroso sobre los insumos y los productos.	Implica un cambio hacia un sistema de suministro más descentralizado y colaborativo, permitiendo mayor flexibilidad y reactividad a las demandas del mercado.
<b>Networking</b>	Los resultados del networking son optimizados a través de la integración de tecnologías digitales y sistemas de producción inteligentes.	Además de aprovechar las tecnologías digitales, se enfoca en la adopción de prácticas de fabricación más sostenibles y eficientes.
<b>Consumidores</b>	Los productos y servicios son a menudo estandarizados, con una personalización limitada basada principalmente en las categorías demográficas de los consumidores.	Pone un gran énfasis en la mejora de la experiencia del consumidor, con productos y servicios personalizados basados en las necesidades y preferencias individuales.

### El Enfoque Centrado en el Humano en la Industria 5.0

Como se ha venido mencionando en las secciones anteriores, la Industria 5.0 marca una nueva era en la producción industrial, donde la colaboración humano-máquina y el enfoque centrado en el humano toman el foco del escenario (Lu, 2017). En contraste con la Industria 4.0, que se enfoca en la automatización y la eficiencia, la Industria 5.0 subraya el valor único del juicio humano y la creatividad (Kolade y Owoseni, 2022). Además, la Industria 5.0 se caracteriza por productos y servicios centrados en el ser humano, en los que las personas están involucradas en todo el proceso de lanzamiento del producto, desde la conceptualización hasta la adquisición continua de servicios durante su ciclo de vida. Por ejemplo, es posible adquirir alimentos, ropa y otros productos adaptados a las necesidades

individuales. Los sistemas de transporte futuristas pueden proporcionar servicios precisos para cada conductor teniendo en cuenta su edad, profesión, destino, entre otros. Asimismo, la red inteligente optimizará la entrega de energía teniendo en cuenta los hábitos de consumo energético de cada uno, su capacidad económica y otros factores, lo que podría aumentar la utilización de la energía y disminuir los costos operativos para toda la sociedad (Huang et al., 2022).

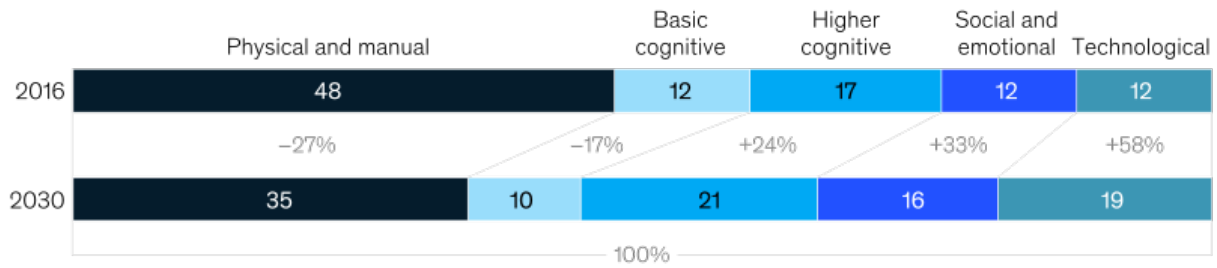
Asimismo, los sistemas de fabricación y procesos de producción se personalizan para acomodar las características individuales de cada trabajador, es decir, su conocimiento, habilidad y experiencia, aumentando las capacidades humanas con el uso de tecnologías avanzadas (Lefranc et al., 2022). Por ejemplo, los robots colaborativos (*cobots*), cuya evolución se observa en la Figura 1.4, pueden adaptar su estrategia de interacción si diferentes trabajadores se unen a la producción colaborativa, mientras que las tecnologías de realidad aumentada/virtual/mixta (AR/VR/MR) pueden ofrecer contenido personalizado para la formación de ingenieros y trabajadores (Huang et al., 2022). Los *cobots* pueden trabajar junto a los trabajadores humanos para realizar tareas repetitivas y físicamente exigentes, lo que permite a los trabajadores centrarse en tareas que requieren más habilidades humanas, como la resolución de problemas y la innovación (European Commission, 2021).



**Figura 1.4:** De la automatización industrial a la cognitiva. Fuente: Adaptado de (Cucuzza, 2023)

Por otro lado, en regiones como Europa y los Estados Unidos, se espera que la demanda de habilidades físicas y manuales en tareas repetitivas y predecibles disminuya en casi un 30 % durante la próxima década, mientras que la demanda de habilidades básicas de alfabetización y cálculo podría caer en casi un 20 %. En contraste, se prevé que la demanda de habilidades tecnológicas (tanto en programación como en interacción con la tecnología) aumente en más del 50 %, y la necesidad de habilidades cognitivas complejas aumentará en una tercera parte. La demanda de habilidades sociales y emocionales de alto nivel, como la iniciativa, el liderazgo y el emprendimiento, también se espera que aumente en más del 30 % (World Economic Forum, 2023, McKinsey, 2018).

Como se observa en la Figura 1.5, las estadísticas ilustran una creciente demanda de habilidades cognitivas, tecnológicas y sociales, lo que respalda la idea de que este cambio puede tener un impacto significativo en el bienestar de los trabajadores. Esto podría llevar a una disminución en la incidencia de lesiones laborales, reforzando así la necesidad de adoptar un enfoque más humano en el lugar de trabajo, alineado con el paradigma de la Industria 5.0 (CEDEFOP, 2023).



**Figura 1.5:** Cambio de competencias en EE.UU. y Europa Occidental por categoría, % del tiempo dedicado. Fuente: (Ellingrud et al., 2020)

La Industria 5.0 busca equilibrar la eficiencia con la sostenibilidad, resaltando la importancia de las prácticas de trabajo justas y equitativas. A través de la implementación de tecnologías emergentes como la realidad aumentada y la inteligencia artificial, se presentan oportunidades para formación y desarrollo profesional, al tiempo que se garantizan condiciones laborales seguras y saludables. Este enfoque pone el bienestar del trabajador en el corazón del proceso productivo. Además, la Industria 5.0 se esfuerza por capturar el valor de las nuevas tecnologías y proporcionar prosperidad más allá de simplemente empleos y crecimiento. Esto se logra respetando los límites planetarios y priorizando el bienestar de los trabajadores industriales, situándolos en el centro del proceso de producción (European Commission, 2021). En conclusión, la Industria 5.0 pone al trabajador en el corazón de la revolución industrial, resaltando sus habilidades únicas y ofreciéndole herramientas para trabajar de manera más eficiente y satisfactoria.

## 1.2.2 Transformación Digital

La TD ha surgido como un elemento clave en el contexto de esta investigación. Este proceso revolucionario no solo abarca la incorporación de tecnologías innovadoras y la digitalización de operaciones, sino que también implica cambios profundos en la forma en que las organizaciones operan y brindan valor a sus clientes (Matt et al., 2015, Tsou y Chen, 2021). En el contexto específico de esta tesis, la TD se examina desde la perspectiva de la interoperabilidad y la adaptabilidad de los dispositivos y sistemas de IoT en la industria, con un enfoque en mejorar las condiciones de trabajo de los obreros, permitiéndoles resaltar los valores netamente humanos. En este sentido, la Industria 5.0 busca realzar el valor añadido que los humanos pueden aportar frente a las máquinas, como la creatividad, la adaptabilidad y la capacidad de tomar decisiones éticas, asegurando que la tecnología actúe como un facilitador que potencie estas cualidades únicas.

De igual manera, la TD se convierte en un motor principal para el desarrollo y la implementación de soluciones IoT en estas áreas, promoviendo la integración efectiva y eficiente de diversos protocolos y tecnologías. Este proceso se facilita mediante el uso de un enfoque de capa de abstracción y estándares como el estándar WoT (Choi et al., 2022).

En esta investigación, la TD también se considera en relación con su papel en la promoción de la Industria 5.0. A través de la TD, se busca facilitar la transición de las pymes, superando los desafíos de interoperabilidad y adaptabilidad que han limitado su progreso hasta ahora (Paschek et al., 2022). En este sentido, la tesis tiene como objetivo demostrar cómo la implementación de tecnologías avanzadas y la digitalización de procesos pueden no solo mejorar la eficiencia operativa de las pymes, sino también crear un entorno de trabajo más humano y sostenible. Al abordar estos desafíos, se pretende establecer un marco que

permita a las pymes integrar soluciones de IoT de manera más efectiva, promoviendo una colaboración fluida entre máquinas y trabajadores humanos. Esto incluye el desarrollo de estrategias para mejorar la interoperabilidad de los sistemas, así como la adaptabilidad de las tecnologías a las necesidades específicas de cada empresa, asegurando que la TD contribuya al bienestar de los trabajadores y a la resiliencia de la industria en general.

## Concepto y Principios de la Transformación Digital

La TD en el ámbito industrial es un fenómeno que trasciende la mera incorporación de nuevas tecnologías. Se refiere a la reconfiguración estratégica de las organizaciones a través de la adopción e integración de tecnologías digitales, procesos comerciales y habilidades, con el propósito de generar valor y éxito en el cambiante entorno digital (de Bem Machado et al., 2022). Se trata de un proceso dinámico, continuo y disruptivo que permea todos los aspectos de la organización, desde la cultura empresarial hasta las operaciones cotidianas (Konopik et al., 2022).



**Figura 1.6:** Los ocho principios básicos para escalar la TD. Fuente: (Kiewell et al., 2022)

Como se puede observar en la Figura 1.6, algunos de los principios básicos de la TD en el contexto industrial se pueden sintetizar de la siguiente manera (Belhadi et al., 2022, Kiewell et al., 2022):

- El liderazgo marca claramente la dirección: El éxito de la transformación digital depende en gran medida de un liderazgo sólido y claro. Las empresas que han tenido éxito en el pasado a menudo han tenido un CEO que establece una ambición audaz desde el principio.
- Una historia de cambio unida y respaldada por la acción: El equipo superior de una

organización debe estar alineado en sus convicciones y acciones para abordar los desafíos específicos de las industrias con muchos recursos. Esta alineación y acción conjunta ayudan a romper los silos organizacionales y fomentan una mentalidad de "fallar rápido." esencial para el éxito en las transformaciones digitales.

- Enfoque en la construcción de capacidades: Para escalar las transformaciones digitales, es esencial contar con las personas adecuadas. Esto puede lograrse mediante la mejora de habilidades de los recursos internos y la contratación de talento externo. Las academias digitales representan la mejor práctica para proporcionar al personal los materiales de aprendizaje óptimos.
- Tratar los temas blandos con el mismo énfasis que los temas duros: Para abrazar la innovación digital, es necesario un cambio en la cultura organizacional que se centra en el rendimiento alto y la salud organizacional. Las transformaciones culturales suelen realizarse en tres fases principales: establecimiento de objetivos, planificación de acciones e implementación.
- Modernizar la base tecnológica: Un núcleo tecnológico modernizado es esencial para escalar los esfuerzos digitales. Esto se basa en cinco pilares: una plataforma común de datos e IA, una capa modernizada de integración de datos y aplicaciones, servicios en la nube mejorados, la integración de iniciativas de planta y corporativas y la definición de capacidades clave que necesitan estandarización.
- Visibilidad del valor a través de lo digital: Es importante tener un proceso de aseguramiento de valor claro para demostrar resultados a menudo y temprano. Todos los pasos de la transformación tecnológica deben traducirse en valor financiero para los accionistas.
- Aprovechar los activos de datos: El enfoque más efectivo para los datos es combinar el conocimiento técnico con principios de gobernanza probados y un enfoque en la mejora de habilidades.
- Implementar en paralelo: Es importante reunir el impulso inicial para el éxito de una transformación digital. Las industrias con muchos recursos deben mostrar valor a través de la digitalización en múltiples activos y dominios en paralelo para crear apoyo en toda la organización. Para hacer esto, se necesita ejecutar un número significativo de casos de uso de alto impacto en paralelo, teniendo en cuenta que algunos de estos casos de uso pueden fallar.

En resumen, la Transformación Digital es un proceso esencial para las empresas que buscan mantenerse competitivas en el dinámico entorno empresarial actual. El concepto va más allá de la simple implementación de tecnologías digitales, requiere un cambio cultural y estratégico en toda la organización. El entendimiento y aplicación de los principios claves de la transformación digital son cruciales para maximizar los beneficios de este cambio. A medida que avanzamos en esta tesis, estos principios y conceptos serán la base para analizar y comprender la relación entre la transformación digital y la Industria 5.0.

## **Impacto de la Transformación Digital en las pymes**

La TD ha revolucionado las pymes al cambiar principalmente cómo funcionan, interactúan con sus clientes y compiten en el mercado. Este fenómeno se ha consolidado como una necesidad esencial en un mundo crecientemente interconectado y propulsado por la

información.

La automatización es un componente crítico de la transformación digital en el sector industrial. Las tecnologías como la robótica y la IA están permitiendo a las pymes automatizar tareas que antes requerían trabajo humano, liberando así a los empleados para que se enfoquen en tareas más estratégicas y menos repetitivas (Davenport, 2018).

Además, la digitalización está mejorando la eficiencia en las operaciones industriales. Las pymes están utilizando sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP por sus siglas en inglés, *Enterprise Resource Planning*) para gestionar sus operaciones de forma más eficiente, integrando varios procesos en un único sistema para mejorar la visibilidad y la toma de decisiones (Haddara et al., 2022).

La TD también está facilitando una mayor personalización de productos en la industria. Las técnicas de producción digital como la impresión 3D están permitiendo a las pymes producir bienes personalizados, ofreciendo productos que satisfacen las necesidades específicas de los clientes (Kane et al., 2015).

Las pymes están utilizando análisis de datos para optimizar sus operaciones industriales. Las tecnologías de *Big Data* e inteligencia de negocios permiten a las empresas recoger y analizar grandes volúmenes de datos, proporcionando grandes ideas que pueden usarse para mejorar los procesos de producción y toma de decisiones (Puspaningrum, 2020). Asimismo, la relación con el cliente también se ha mejorado gracias a los datos recopilados de las interacciones de los clientes, los mismo que se utilizan para proporcionar una experiencia de cliente personalizada. La capacidad de segmentar a los clientes en función de sus preferencias y comportamiento de compra permite a las pymes diseñar ofertas más atractivas y centradas en el cliente (Daud et al., 2022).

El análisis de datos e inteligencia de negocios también proporciona a las pymes la capacidad de tomar decisiones más informadas. Estas empresas pueden utilizar sus datos para identificar tendencias, patrones y oportunidades, permitiéndoles tomar decisiones estratégicas basadas en evidencia (Stjepić et al., 2021).

Por otro lado, uno de los aspectos más notables de este cambio es cómo la automatización y la IA están optimizando los procesos comerciales. Las pymes pueden reducir los costos y aumentar la eficiencia mediante el uso de tecnologías innovadoras que automatizan tareas repetitivas y proporcionan soluciones más inteligentes. Por ejemplo, el uso de *chatbots* y asistentes virtuales para el servicio al cliente permite a estas empresas manejar un mayor volumen de consultas de manera más efectiva, liberando al personal para concentrarse en tareas más estratégicas (Davenport, 2018).

Asimismo, las pymes pueden ampliar su alcance a través de la digitalización. El comercio electrónico y las redes sociales eliminan las barreras geográficas, permitiendo a las pymes llegar a los clientes de todo el mundo y competir en un terreno más igualitario con las empresas más grandes (Wardati y Mahendrawathi, 2019).

La TD está reformulando el panorama industrial en las pymes, proporcionando una mayor eficiencia, productividad y personalización. Al mismo tiempo, este cambio ha generado una revolución, redefiniendo la forma en que estas empresas operan, interactúan con sus clientes y toman decisiones. Si bien el camino hacia la adopción de estas tecnologías puede estar lleno de desafíos, las ventajas notables y el vasto potencial que ofrecen para mejorar la eficiencia, la competitividad y la experiencia del cliente son innegables.

## Barreras y Desafíos de la Transformación Digital

La TD, a pesar de sus numerosos beneficios, no se encuentra libre de desafíos y barreras. A medida que las empresas se adaptan y compiten en la era digital, se enfrentan a una variedad de obstáculos (Vogelsang et al., 2019).

- **Falta de comprensión y habilidades digitales:** No todas las empresas entienden completamente lo que implica la TD o cómo puede ayudarles. Además, a menudo carecen de las habilidades digitales necesarias en su fuerza laboral para implementar y administrar nuevas tecnologías (Teng et al., 2022).
- **Resistencia al cambio:** Esta resistencia se hace especialmente evidente cuando se trata de implementar nuevas tecnologías que cambian fundamentalmente la forma en que se realizan las operaciones industriales. A menudo, estos cambios implican la adopción de tecnologías emergentes que facilitan la automatización, la toma de decisiones basada en datos y la personalización a gran escala (Rodríguez-Espíndola et al., 2022). Estas evoluciones pueden generar inseguridad a nivel de liderazgo y empleados, quienes deben adaptarse a nuevas formas de trabajar y a menudo adquirir nuevas habilidades (Faridi y Malik, 2020).
- **Seguridad y privacidad de los datos:** A medida que las empresas se vuelven más digitales, la seguridad de los datos se convierte en un problema cada vez mayor. Los ciberataques son una amenaza constante y las empresas deben asegurarse de que sus datos estén seguros (Rupeika-Apoga et al., 2022).
- **Costo:** Implementar nuevas tecnologías puede ser costoso, especialmente para las pequeñas y medianas empresas que pueden tener recursos limitados (Skare et al., 2023).
- **Infraestructura tecnológica:** Para las empresas con una infraestructura tecnológica anticuada, la actualización a las nuevas tecnologías puede ser un desafío significativo (Priyono et al., 2020).

A pesar de esto, es crucial para las empresas superar los obstáculos que se presentan y poder maximizar las oportunidades que ofrece la transformación digital. La clave reside en reconocer estos desafíos y afrontarlos de manera proactiva, desarrollando una estrategia de transformación digital bien concebida que tenga en cuenta estos retos y busque formas de superarlos (Fachrunnisa et al., 2020).

### 1.2.3 Interoperabilidad Semántica

La Interoperabilidad Semántica representa un componente vital en la moderna transformación digital, especialmente en el contexto de las pymes industriales (Hodapp y Hanelt, 2022). Esta se refiere a la habilidad de sistemas heterogéneos y aplicaciones para compartir, intercambiar y comprender datos de manera efectiva (Pal, 2022). A medida que las empresas adoptan una multitud de tecnologías emergentes, la necesidad de una comunicación clara y coherente entre estas tecnologías se vuelve cada vez más crucial (Burns et al., 2019). En esta sección, se profundizará en la importancia de la interoperabilidad semántica y cómo puede ser un factor determinante en el éxito de la adopción de las tecnologías digitales en las empresas.

## **Definición de Interoperabilidad e Interoperabilidad Semántica**

Retomando lo abordado en la sección 1.2.2, se define la interoperabilidad como la capacidad intrínseca que tienen diferentes sistemas o aplicaciones para comunicarse de manera efectiva, permitiendo el intercambio y utilización eficiente de información compartida (Zeng, 2019). Esta característica es fundamental en el panorama tecnológico contemporáneo, ya que facilita la colaboración eficiente entre múltiples entidades digitales, lo cual es crucial para la operatividad de un ecosistema creciente y cada vez más complejo de tecnologías interconectadas (Blobel y Oemig, 2015, X. V. Wang et al., 2018).

Por otro lado, la Interoperabilidad Semántica lleva este concepto un paso más allá. No solo se centra en la posibilidad de intercambio de información, sino también en la correcta interpretación de dicha información por parte de los sistemas involucrados (Rahman y Hussain, 2020). De esta forma, la Interoperabilidad Semántica se convierte en una pieza clave para las empresas que buscan maximizar los beneficios de su transformación digital, ya que garantiza que todos los componentes de su ecosistema tecnológico puedan 'hablar el mismo idioma' y entender la información que se les proporciona (Pereira et al., 2021).

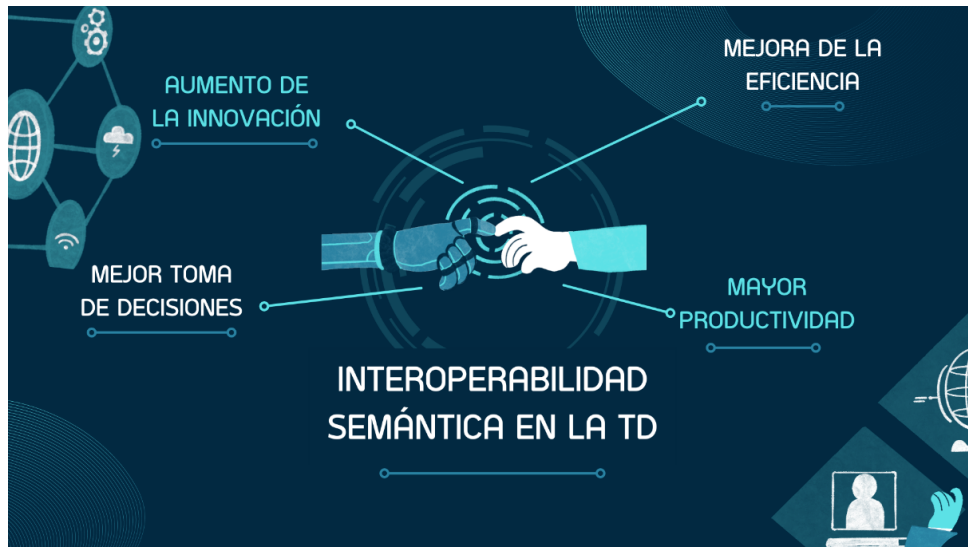
Aplicando esto al contexto de los procesos industriales modernos, la Interoperabilidad Semántica es un factor crucial para garantizar la efectiva comunicación y coordinación entre las múltiples tecnologías y sistemas digitales que se están utilizando. De igual forma, se puede deducir que las empresas que logran una alta Interoperabilidad Semántica están mejor equipadas para optimizar sus procesos, tomar decisiones basadas en datos y ofrecer un alto grado de personalización y eficiencia (Tepe et al., 2022).

## **Importancia de la Interoperabilidad en la Transformación Digital**

En medio de la transformación digital, la interoperabilidad se convierte en un componente esencial que permite a las empresas compartir datos y colaborar eficientemente.

A continuación, se desarrollan con mayor detalle los beneficios que la interoperabilidad puede brindar a las organizaciones:

- **Mejora de la eficiencia:** Al eliminar la necesidad de duplicar trabajo o convertir datos de un formato a otro, la interoperabilidad optimiza los procesos, permitiendo así un mejor uso de los recursos disponibles (Schmeelk et al., 2022).
- **Mayor productividad:** Mediante el acceso y colaboración rápida y sencilla con la información, la interoperabilidad propicia un aumento en la productividad de la empresa (Khatoon y Ahmed, 2022).
- **Mejor toma de decisiones:** El acceso a una gama más amplia de información y perspectivas posibilitado por la interoperabilidad mejora la toma de decisiones en las empresas (Antonios et al., 2023).
- **Aumento de la innovación:** La interoperabilidad favorece el intercambio de ideas y la colaboración en nuevos proyectos, lo que puede resultar en una mayor innovación (Legner et al., 2017).



**Figura 1.7:** Beneficios de la interoperabilidad semántica en la TD.

La Figura 1.7 ilustra de manera concisa los beneficios esenciales que la interoperabilidad puede conferir a las organizaciones, consolidando los conceptos previamente abordados en este documento. Se pone de manifiesto cómo la interoperabilidad puede potenciar la eficiencia, adaptabilidad y colaboración dentro de los ecosistemas tecnológicos modernos (Pedone y Mezgár, 2018).

La interoperabilidad se convierte, por tanto, en un pilar fundamental para la TD. Permite a las empresas compartir datos y colaborar de manera eficiente, potenciando su eficiencia, productividad, toma de decisiones e innovación (Bergmann et al., 2020). La literatura muestra múltiples casos de éxito y buenas prácticas de cómo la interoperabilidad mejora aspectos fundamentales de la estrategia de negocio. Se destacan tres ejemplos, por su relevancia en las citaciones y el proceso disruptivo que presentan (Pollock y Hodgson, 2004):

- Una empresa de fabricación podría aprovechar la interoperabilidad para compartir datos entre sus sistemas de producción y de gestión de inventario, mejorando así la eficiencia de la producción y reduciendo costos (L. Xu et al., 2020).
- Una empresa de servicios financieros podría utilizar la interoperabilidad para compartir datos entre sus sistemas de banca en línea y de banca móvil, proporcionando así a sus clientes una experiencia bancaria más conveniente y personalizada (Brunnermeier y Payne, 2022).
- Un hospital podría utilizar la interoperabilidad para compartir datos entre sus sistemas de registros médicos electrónicos y de imágenes médicas, permitiendo a los médicos proporcionar atención más precisa y oportuna a sus pacientes (Ndlovu et al., 2021).

Estos ejemplos ilustran cómo la interoperabilidad puede catalizar la transformación digital. A medida que el mundo se vuelve cada vez más digital, la interoperabilidad no solo se convierte en una pieza crítica para que las empresas puedan competir y prosperar, sino que también se posiciona como un facilitador clave para la adopción de un enfoque centrado en el ser humano (Delaram y Valilai, 2017). A través de la interoperabilidad, las empresas pueden mejorar la experiencia del usuario, personalizando servicios y productos

en función de la información compartida, lo que conduce a un mayor nivel de satisfacción y participación por parte de los clientes, empleados y todas las partes interesadas en general (Ordieres-Meré et al., 2023).

### **Retos y Estrategias para la Implementación de la Interoperabilidad Semántica**

La implementación efectiva de la interoperabilidad semántica puede presentar una serie de desafíos, algunos de los cuales se describen en la Tabla 1.2:

**Tabla 1.2:** Desafíos y Análisis de la Interoperabilidad Semántica

<b>Desafío</b>	<b>Análisis</b>
<b>Incompatibilidad entre estándares</b>	Las diferencias entre los estándares técnicos y semánticos utilizados por diferentes sistemas pueden dificultar la comunicación y el intercambio efectivo de información (Panetto y Molina, 2008, Noura et al., 2019).
<b>Falta de definiciones claras y consistentes</b>	La falta de definiciones claras y consistentes para los términos y conceptos utilizados en diferentes sistemas puede dificultar la comprensión y el uso eficaz de los datos compartidos (Melby et al., 2012, Piroumian, 2021).
<b>Falta de políticas y regulaciones consistentes</b>	La falta de políticas y regulaciones consistentes para el manejo y la protección de los datos de las empresas puede dificultar la implementación efectiva de la interoperabilidad semántica (Freij et al., 2019, Saleem et al., 2018).



**Figura 1.8:** Beneficios de la interoperabilidad semántica en la TD.

La Figura 1.8 proporciona un resumen visual de tres desafíos principales de la interoperabilidad: la incompatibilidad entre estándares, la falta de definiciones claras y consistentes, y la ausencia de políticas y regulaciones coherentes. Estos elementos constituyen barreras significativas para la implementación efectiva de la interoperabilidad semántica (Rajput y Singh, 2021).

A pesar de estos desafíos, hay varias estrategias que las organizaciones pueden implementar para facilitar la interoperabilidad semántica. Un análisis de la literatura en el área proporciona las siguientes estrategias:

- **Adopción de estándares comunes:** Adoptar estándares comunes para la definición y la comunicación de los datos puede ayudar a superar las barreras de la incompatibilidad entre los sistemas (da Rocha et al., 2020).
- **Desarrollo de políticas y regulaciones claras y consistentes:** El desarrollo de políticas y regulaciones claras y consistentes para el manejo y la protección de los datos puede ayudar a garantizar la seguridad y la privacidad de los datos compartidos (Park et al., 2023).
- **Formación y capacitación continua:** La formación y la capacitación continua de los empleados y las partes interesadas pueden ayudar a garantizar la comprensión y el uso efectivo de los datos compartidos (Nevmerzhitskaya et al., 2019, Sun et al., 2020).

Concluyendo esta sección, la Tabla 1.3 resalta de manera concisa las estrategias de solución

planteadas para cada desafío identificado al momento de plantear la implementación de la interoperabilidad semántica en la TD. Desde la complejidad técnica hasta las barreras culturales y organizativas son obstáculos que representan la amplia gama de problemas a superar para lograr una interoperabilidad eficiente. Sin embargo, es importante ver a estos desafíos como el inicio de un camino hacia la mejora y el progreso a través de una completa transformación digital. Cada uno de estos retos puede dar lugar a oportunidades para impulsar cambios positivos y mejorar la implementación de estrategias digitales.

**Tabla 1.3:** Interoperabilidad semántica: desafíos y estrategias de solución

Desafíos	Estrategia de Solución
Incompatibilidad entre estándares	Adopción de estándares comunes
Falta de definiciones claras y consistentes	Formación y capacitación continua
Falta de políticas y regulaciones consistentes	Desarrollo de políticas y regulaciones claras y consistentes

#### 1.2.4 El estándar *Web of Things*

El Estándar *Web of Things* emerge como una propuesta potencialmente revolucionaria en el marco del IoT. Este enfoque, respaldado por el *World Wide Web Consortium* (W3C), busca la estandarización y la universalidad en la comunicación entre dispositivos y sistemas, siguiendo los mismos principios que hicieron de la *World Wide Web* un éxito global. A través de la creación de estándares abiertos y consensuados, el WoT aspira a permitir la interoperabilidad entre una diversidad de dispositivos, plataformas y aplicaciones, desde simples sensores y actuadores hasta sistemas más complejos y sofisticados. Este nuevo paradigma abre un sinfín de posibilidades en términos de innovación, eficiencia y conveniencia para los usuarios, pero también plantea desafíos significativos, especialmente en términos de seguridad, privacidad y adaptabilidad a las tecnologías existentes (W3C World Wide Web Consortium, 2023a).

#### Definición y Principios del WoT

El WoT es una extensión de la idea del *Internet of Things*. Mientras que el IoT se refiere a la interconexión de dispositivos físicos (desde electrodomésticos hasta maquinaria industrial) con software, sensores y otros dispositivos para el intercambio de datos, el WoT busca llevar este concepto al siguiente nivel al integrar estos dispositivos con la Web (W3C World Wide Web Consortium, 2023b).

El WoT proporciona una plataforma en la que se pueden aprovechar las tecnologías y protocolos web existentes para permitir la comunicación y cooperación entre objetos en la red. Esto significa que cada objeto conectado, ya sea un teléfono móvil, una máquina de café o un vehículo autónomo, puede ser accesible y controlable a través de la web (Simeoni et al., 2021)

El WoT se basa en una serie de principios clave que incluyen (Guinard et al., 2011, W3C World Wide Web Consortium, 2023a:

- **Interoperabilidad:** Dado que el WoT se basa en estándares web, garantiza la interoperabilidad entre diversos dispositivos y aplicaciones, lo que facilita el intercambio de datos y la colaboración.
- **Accesibilidad y descubrimiento:** Al igual que cualquier página web, los dispositivos WoT pueden ser descubiertos a través de motores de búsqueda y accedidos a través de URLs.
- **Seguridad:** La integración de la seguridad en el nivel de la web proporciona una capa adicional de protección para los dispositivos conectados. Este enfoque ayuda a proteger contra amenazas comunes como ataques DDoS y violaciones de datos.
- **Privacidad:** Los principios de privacidad y control del usuario son fundamentales en el WoT. Los usuarios tienen el control sobre sus datos y cómo se comparten.
- **Interfaz uniforme:** El WoT promueve una interfaz uniforme a través de la cual los dispositivos pueden comunicarse, independientemente de su fabricante o modelo.



**Figura 1.9:** Principios del WoT

Los principios del WoT se entrelazan de manera intrincada, creando un sistema en el que cada componente fortalece al otro. La interoperabilidad y la accesibilidad trabajan en conjunto para facilitar el intercambio y el acceso a la información, mientras que la seguridad y la privacidad se articulan para proteger la integridad del sistema y los datos personales (Laadhar et al., 2022). Además, la interoperabilidad respalda una interfaz uniforme para mejorar la comunicación entre dispositivos, y esta uniformidad en la interfaz también contribuye a fortalecer la seguridad. Finalmente, la privacidad y la accesibilidad se equilibran para garantizar el acceso seguro a la información (Charpenay et al., 2021). Esta interrelación y refuerzo mutuo de los principios se puede visualizar claramente en la Figura 1.9.

### **Aplicaciones y Beneficios del WoT**

El WoT presenta un amplio espectro de aplicaciones y beneficios que impactan en múltiples sectores, desde el cuidado de la salud hasta la agricultura, pasando por la fabricación y las ciudades inteligentes.

En el sector sanitario, por ejemplo, el WoT puede mejorar la monitorización y la atención al paciente. Los dispositivos médicos conectados pueden recoger y transmitir datos de salud en tiempo real, lo que permite un monitoreo constante y brinda a los médicos información actualizada y precisa (Aguzzi et al., 2021).

El estándar WoT aplicado en la agricultura, puede potenciar la agricultura de precisión, permitiendo a los agricultores controlar y optimizar sus operaciones basándose en datos en tiempo real. Los sensores pueden medir factores ambientales como la humedad del suelo y la temperatura, y estos datos pueden ser utilizados para ajustar automáticamente los sistemas de riego y otros procesos (Farooq et al., 2023).

En la fabricación, puede habilitar la producción inteligente, lo que aumenta la eficiencia y reduce los costos. Los sensores y dispositivos IoT pueden recoger datos de la producción en tiempo real, lo que permite la constante monitorización de la eficiencia y la identificación rápida de problemas (Ciortea et al., 2019).

Además, en las ciudades inteligentes, puede mejorar la calidad de vida al permitir la monitorización y gestión eficiente de los servicios públicos, desde la iluminación de las calles hasta el tráfico y el transporte público (Jain y Rani, 2020).

La Tabla 1.4 proporciona una visión más detallada de cómo el WoT se está aplicando en diferentes dominios.

**Tabla 1.4:** Dominios de aplicación del WoT. Fuente: Adaptado de (W3C World Wide Web Consortium, 2023b)

Dominios de aplicación	Descripción
<b>Hogar Inteligente</b>	El WoT puede permitir una integración más sencilla de diversos dispositivos y servicios, desde iluminación y seguridad hasta control de energía.
<b>Ciudades Inteligentes</b>	Las aplicaciones WoT pueden ayudar a mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las ciudades al proporcionar servicios como el seguimiento de vehículos de servicio público y la optimización del uso de la energía.
<b>Industria 4.0</b>	El WoT puede proporcionar una integración más sencilla y segura de sistemas en la producción y fabricación, así como la mejora del mantenimiento y la seguridad.
<b>Agricultura Inteligente</b>	El WoT puede permitir la monitorización y control remoto de los sistemas de agricultura, lo que puede ayudar a mejorar la eficiencia y sostenibilidad de estas operaciones.
<b>Salud y Asistencia Social</b>	El WoT puede facilitar sistemas de atención médica y asistencia social, permitiendo el seguimiento remoto de la salud del paciente y el control de los servicios de asistencia.

En términos de beneficios, el WoT ofrece la capacidad de tomar decisiones basadas en datos, lo que puede resultar en una mayor eficiencia y productividad. La recopilación y el análisis de datos en tiempo real permiten a las organizaciones identificar patrones y tendencias, lo que puede conducir a mejoras operativas (Vimal et al., 2020). Además, el WoT puede facilitar una mayor automatización, lo que reduce la necesidad de intervención humana y puede conducir a una mayor precisión y velocidad (Yu et al., 2021).

### WoT en la Industria 5.0

La implementación de estándar WoT en la Industria 5.0 se convierte en una intersección fascinante y prometedora de tecnologías emergentes. Como se ha mencionado previamente, el WoT facilita la comunicación y la colaboración entre máquinas, sistemas y humanos, lo que puede conducir a mejoras significativas en la eficiencia, la productividad y la personalización de los procesos productivos (Tu et al., 2023). Los dispositivos inteligentes y las máquinas interconectadas pueden recolectar y analizar datos en tiempo real, permitiendo la optimización continua de los procesos y la adaptación dinámica a las fluctuaciones de la demanda o a las variaciones en las condiciones de producción (Sambhi et al., 2021).

En el contexto de la Industria 5.0, que se caracteriza por una mayor personalización, eficiencia y colaboración hombre-máquina, el WoT puede ser un habilitador crítico de estas capacidades. Al generar una mejor recopilación, análisis y aplicación de los datos, el WoT puede facilitar el cambio hacia sistemas de producción más flexibles y receptivos (Ciortea et al., 2019).

Sin embargo, a pesar de su potencial, la implementación del WoT en la Industria 5.0

presenta desafíos significativos, como los expuestos en las secciones previas. Estos pueden incluir cuestiones de seguridad y privacidad de los datos, la necesidad de estándares interoperables y problemas de escalabilidad y fiabilidad (Murawat et al., 2020). Además, la necesidad de un equilibrio cuidadoso entre la automatización y la intervención humana, y de un cambio de mentalidad hacia una colaboración más estrecha entre humanos y máquinas, puede presentar desafíos culturales y organizativos (Anees et al., 2023).

Por todo lo mencionado anteriormente, nace la necesidad de que se lleven a cabo más investigaciones para explorar en profundidad cómo superar estos desafíos y maximizar el potencial del WoT en la Industria 5.0. La exploración de modelos y enfoques innovadores para la implementación del WoT, así como la comprensión de cómo estos pueden adaptarse y aplicarse a diferentes contextos industriales, será un área de investigación clave para el futuro (Larian et al., 2022).

### **1.2.5 Modelos de Arquitectura de Referencia y Estándares Industriales**

Los modelos de arquitectura de referencia y los estándares industriales representan fundamentos esenciales para la implementación efectiva de sistemas altamente integrados y estandarizados en el entorno de la industria (Moghaddam et al., 2018). Estos modelos y estándares proporcionan una guía estratégica y técnica para los sistemas industriales, permitiendo la interoperabilidad, la eficiencia y la escalabilidad (Weyrich y Ebert, 2015). En esta sección, exploraremos diversos modelos de arquitectura de referencia y estándares industriales que son de gran relevancia en el contexto de la TD y la Industria 5.0, analizando su importancia y su papel en la facilitación de una implementación efectiva y segura de tecnologías avanzadas.

#### **Definición y Clasificación de los Estándares Industriales**

Los estándares industriales son reglas o directrices consensuadas que definen los requisitos mínimos o las especificaciones técnicas que deben cumplir los procesos, los productos, los servicios, los sistemas y las personas en un sector industrial particular (Barleta et al., 2020). Estos estándares son esenciales para garantizar la calidad, la seguridad, la eficiencia y la interoperabilidad en la industria. Los estándares industriales pueden clasificarse de diversas formas, dependiendo del aspecto que se quiera resaltar (Zuehlke, 2019).

La Tabla 1.5 muestra de manera esquemática la clasificación de los estándares industriales según su alcance, objeto y obligatoriedad.

**Tabla 1.5:** Clasificación de los estándares industriales. Fuente: Adaptado de (Grangel-González et al., 2017, Suvarna et al., 2020, Q. Li et al., 2018, Zuehlke, 2019, Barleta et al., 2020)

Clasificación	Descripción
<b>Alcance</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Internacionales: desarrollados por organismos internacionales como la ISO, aplicables mundialmente.</li> <li>• Regionales: específicos para una región.</li> <li>• Nacionales: específicos para un país.</li> </ul>
<b>Objeto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Producto: especifican características de productos.</li> <li>• Proceso: se refieren a cómo realizar actividades.</li> <li>• Sistema: para sistemas de gestión, como ISO 9001.</li> <li>• Ensayo: cómo realizar pruebas de productos o procesos.</li> </ul>
<b>Obligatoriedad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obligatorios: impuestos por ley.</li> <li>• Voluntarios: adoptados por elección para mejorar operaciones.</li> </ul>

Es importante mencionar que los estándares industriales son desarrollados y mantenidos por organizaciones de normalización, que pueden ser organismos internacionales, regionales o nacionales, y que suelen contar con la participación de diversas partes interesadas, como empresas, organismos gubernamentales, instituciones de investigación, entre otros (Burns et al., 2019).

### Modelos de Arquitectura de Referencia en la Industria

Los Modelos de Arquitectura de Referencia (RAM, por sus siglas en inglés *Reference Architecture Models*) proporcionan un marco estructurado que permite el diseño y la implementación de sistemas industriales (Geest et al., 2021). Sirven como modelos que se pueden usar para diseñar soluciones de arquitectura que se adapten a las necesidades y objetivos específicos de una organización. Existen varios modelos de arquitectura de referencia en el contexto industrial que han sido desarrollados y adoptados a nivel mundial (Yli-Ojanperä et al., 2019).

- Modelo de arquitectura de referencia de Industria 4.0 (RAMI 4.0, por sus siglas en inglés): Es un modelo tridimensional que combina varios aspectos de la industria 4.0 en un marco coherente (Hankel y Rexroth, 2015). Representa tanto los aspectos del producto (hardware y software) como los aspectos de negocio y operativos (Resman et al., 2019).
- IIRA (del inglés *Industrial Internet Reference Architecture*): Desarrollado por el Consorcio Industrial de Internet (IIC), el IIRA proporciona una arquitectura de sistema abierta y flexible que puede ser adaptada para diversas aplicaciones y sectores industriales (Lin et al., 2015).
- ISA-95: Este modelo proporciona una estructura para integrar sistemas de automatización industrial con sistemas de gestión empresarial (Scholten, 2007).

Estos modelos proporcionan guías útiles para la implementación de tecnologías digitales

en la industria, y son clave para alcanzar la interoperabilidad semántica y la integración de sistemas.

## **Importancia y Aplicación de los Estándares Industriales en la Transformación Digital**

Los estándares industriales juegan un papel fundamental en la TD de las industrias. Proporcionan un conjunto común de directrices y especificaciones que aseguran la compatibilidad, la interoperabilidad, la seguridad, y la eficiencia de las tecnologías digitales implementadas. A continuación, se detallan algunas de las razones por las que los estándares industriales son esenciales en el contexto de la TD:

- **Interoperabilidad:** Los estándares industriales facilitan la interoperabilidad entre diferentes sistemas y dispositivos. Esto es particularmente importante en un entorno industrial, donde los sistemas y equipos de diferentes fabricantes deben poder trabajar juntos de manera efectiva (Sisinni et al., 2018). La adhesión a los estándares industriales garantiza que los diferentes componentes del sistema pueden intercambiar información y colaborar en tareas comunes (Jaloudi, 2019).
- **Eficiencia y Productividad:** Al adherirse a los estándares industriales, las empresas pueden aumentar la eficiencia y la productividad de sus operaciones. Los estándares definen las mejores prácticas que pueden ayudar a las organizaciones a optimizar sus procesos y eliminar los cuellos de botella (Serror et al., 2020). Además, el uso de estándares puede reducir la necesidad de personalización y simplificar la integración de nuevos sistemas y tecnologías (Serpanos et al., 2018).
- **Seguridad:** Los estándares industriales también son esenciales para garantizar la seguridad de los sistemas digitales. Establecen directrices y requisitos para áreas clave como la protección de datos, la ciberseguridad y la seguridad física de los sistemas (Sadeghi et al., 2015, Khan et al., 2020).

Los estándares industriales son aplicados en diversas áreas en la transformación digital. Por ejemplo, la Arquitectura Unificada de Comunicaciones de Plataforma Abierta (OPC UA, del inglés *Open Platform Communications Unified Architecture*) se utiliza en la industria manufacturera para asegurar la interoperabilidad entre los sistemas de control y los sistemas de información (Leitner y Mahnke, 2006). De manera similar, en el sector de la salud, el estándar HL7 (*Health Level Seven International*) se utiliza para el intercambio, integración, compartición, y recuperación de la información de salud electrónica (Dolin et al., 2001).

En conclusión, los estándares industriales son una herramienta esencial para las empresas que buscan adoptar y beneficiarse de las tecnologías digitales. Facilitan la interoperabilidad, mejoran la eficiencia, aseguran la seguridad, y permiten a las empresas adaptarse a los cambios y aprovechar las oportunidades de la TD (Burns et al., 2019).

### **1.2.6 FIWARE como arquitectura de referencia para una industria inteligente**

FIWARE es una plataforma abierta, genérica y extensible que se alinea con el enfoque de los Modelos de AR descritos al inicio del capítulo. Centrada principalmente en apoyar el desarrollo de aplicaciones para entornos inteligentes, FIWARE facilita el acceso a un rico

conjunto de servicios web universales y fáciles de usar, que permiten el almacenamiento y la gestión de datos provenientes de diferentes fuentes y dispositivos. Actualmente, se considera una Arquitectura de Referencia de Transformación Digital ampliamente utilizada en múltiples sectores y dominios (Kumar et al., 2014, Rejeb et al., 2022).

Con este amplio uso de AR para facilitar la interoperabilidad entre sistemas, reducir los costos y riesgos de integración, y adoptar estándares y mejores prácticas, FIWARE se ha convertido en una implementación común de middleware debido a sus capacidades de código abierto y al amplio apoyo de las actividades de investigación (Alonso et al., 2018). Este apoyo a la investigación ha permitido la incorporación de componentes a FIWARE, denominados Facilitadores Genéricos (FG), que abren el desarrollo de nuevas aplicaciones inteligentes, resolviendo problemas en entornos heterogéneos, superando diferentes enfoques de protocolo y mejorando las capacidades de la información almacenada.

Actualmente, FIWARE, a diferencia de otras plataformas, no solo ofrece un conjunto de herramientas y servicios para facilitar el desarrollo de soluciones inteligentes, sino que también proporciona un conjunto de estándares para la gestión de datos de contexto a través de su Context Broker (CB), el Orion-LD CB (Conde et al., 2022). En un despliegue de arquitectura FIWARE, toda la comunicación entre las aplicaciones y los dispositivos IoT es realizada por el CB, lo que significa que los FG facilitan la comunicación entre los productores de información y sus consumidores.

### **1.2.7 *Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA)***

OPC UA es un marco de comunicación fundamental en el ámbito de la automatización industrial y los sistemas de control (J. T. D. Silva et al., 2023). En esencia, OPC UA define un modelo de mensajería estructurado que facilita el intercambio seguro y fiable de información entre varios dispositivos y sistemas (Conti et al., 2021). Esto se basa en el espíritu de la arquitectura orientada a servicios, que permite a OPC UA encapsular una miríada de interacciones de comunicación dentro de llamadas a servicios bien definidos (Mahnke et al., 2009). El formato estandarizado del modelo es un testimonio de su promesa de garantizar la interoperabilidad entre diversas implementaciones. Además, las avanzadas medidas de seguridad que incorpora subrayan su compromiso con el mantenimiento de unas comunicaciones seguras y auténticas. La versatilidad de OPC UA se pone aún más de manifiesto en su capacidad para admitir diversos protocolos de comunicación, como TCP/IP y HTTPS, lo que le permite integrarse sin esfuerzo en entornos heterogéneos. Su adaptabilidad inherente garantiza que OPC UA siga siendo receptivo y pueda evolucionar a la par que las necesidades cambiantes de la industria (Pribiš et al., 2019). Sin embargo, aunque los puntos fuertes subrayan la eficacia de OPC UA, también es esencial destacar algunos retos inherentes. La naturaleza extensible y rica en funciones de OPC UA puede, en ocasiones, hacer que resulte complejo, especialmente para quienes se inician en el uso de este marco. Las implementaciones en dispositivos con recursos limitados también pueden enfrentarse a retos debido a las demandas de memoria y procesamiento asociadas a OPC UA. Además, la profundidad y riqueza que aporta OPC UA también introducen una curva de aprendizaje que los interesados deben superar para obtener el máximo valor (Pauker et al., 2016). En definitiva, OPC UA, con su amplia adopción en la industria de la automatización, es sin lugar a dudas uno de los pioneros en el ámbito de los estándares de comunicación industrial (J. T. D. Silva et al., 2023). Sin embargo, una comprensión

matizada de sus capacidades y desafíos es fundamental para su aplicación eficaz (D. Silva et al., 2021).

### 1.2.8 Mano de obra, interoperabilidad y transformación: Poniendo al trabajador en el centro

El papel central del trabajador en la era digital, y cómo la interoperabilidad y la transformación digital afectan a este último, es un elemento esencial de la discusión en el entorno laboral actual (Puhovichova y Jankeľova, 2020). Este enfoque se vuelve particularmente relevante en vista del acelerado cambio tecnológico que caracteriza nuestra época, abarcando fenómenos como la transición verde y digital, la economía de plataformas y la creciente colaboración entre humanos y máquinas (D’Cruz et al., 2022).

El desafío que presenta esta nueva realidad laboral se acentúa en Europa debido al impacto añadido de la digitalización y la transición ecológica, todo ello en un contexto marcado por una crisis laboral derivada de la pandemia de COVID-19 (Kim et al., 2022). Ante este panorama, la Comisión Europea ha puesto el foco en la formación y reeducación de los trabajadores como una prioridad a abordar por todos los estados miembros (Comission, 2022).

En esta dirección se enmarca la iniciativa "Año de las Habilidades" de la Comisión Europea, que surge como una respuesta estratégica a los desafíos del momento. El programa se centra en promover la capacitación, la formación y las iniciativas de innovación a lo largo y ancho de los estados miembros, con la finalidad de asegurar que la fuerza laboral europea esté adecuadamente preparada para enfrentar las oportunidades y retos de la economía digital y verde (Gauret, 2023).

De igual manera, la Estrategia Industrial Europea da especial relevancia al futuro del trabajo, promoviendo la transformación de la industria para construir una economía resiliente, verde y digital. En este contexto, la investigación y la innovación son reconocidas como pilares fundamentales del proceso, y el futuro del trabajo se erige como un elemento crucial en el Plan de Acción del Pilar Europeo de Derechos Sociales (Cappellin et al., 2020).

Este enfoque del impacto de la digitalización y la transición verde en el trabajador y la imperante necesidad de impulsar la capacitación y la recalificación es de gran relevancia para el propósito de esta tesis. Ofrece un marco de referencia para entender cómo estos cambios influyen en los trabajadores y subraya la importancia de colocar al trabajador en el epicentro de la transformación digital (Fukuyama, 2018).

En resumen, centrar la transformación digital en el trabajador implica no solo considerar cómo la digitalización y la transición verde pueden afectar los roles y habilidades de los trabajadores, sino también cómo las políticas y prácticas pueden adaptarse para apoyar a los trabajadores en este escenario en constante cambio (Hildebrandt et al., 2019). Este camino incluye la generación de oportunidades de formación y aprendizaje para los trabajadores, así como la adaptación de las políticas sociales para proteger y respaldar a los trabajadores en medio de estos cambios (Deganis et al., 2021). Este enfoque centrado en el trabajador es esencial para fomentar una mayor productividad, el empoderamiento de los trabajadores y el cumplimiento de los objetivos sociales y laborales más ambiciosos (Liu et al., 2021).

### 1.3 Definición y estructura del documento

Esta tesis doctoral tiene como objetivo principal proponer un marco que no solo facilite los procesos de TD en las organizaciones, sino que también los humanice, superando los retos de la interoperabilidad semántica y maximizando las ventajas del IoT.

El presente documento se organiza de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introducción: Se ofrece una visión general de los temas relevantes para la investigación, proporcionando una base sólida sobre la TD, la interoperabilidad semántica, el IoT, el WoT y los modelos de arquitectura de referencia y estándares industriales.

Capítulo 2. Hipótesis y Objetivos: Se detalla la hipótesis de investigación y se establecen los objetivos del estudio, delineando la ruta a seguir para validar dicha hipótesis.

Capítulo 3. Materiales y Métodos: Se presenta la metodología adoptada en el estudio, los materiales utilizados y los métodos de análisis y verificación de los datos.

Capítulo 4. Desarrollando WoT-IL: Un Enfoque Semántico para Mejorar la Interoperabilidad en la Transformación Digital. En este capítulo se propone un marco integral para superar los desafíos de interoperabilidad en los procesos de TD, destacando el uso del WoT como estándar clave para fomentar estos procesos centrados en el ser humano.

Capítulo 5. Resultados y Validación: Se presentan y analizan los resultados obtenidos en el estudio, poniendo de manifiesto las ventajas de la implementación del marco propuesto y su impacto positivo en los trabajadores en el contexto de la TD.

Capítulo 6. Discusión y Conclusiones: Finalmente, se discuten en profundidad los hallazgos del estudio y se reflexiona sobre las implicaciones de los resultados, marcando el camino para futuras investigaciones en este campo.



# Capítulo 2

## Hipótesis y Objetivos

Este capítulo desglosa la hipótesis, el objetivo general, los objetivos específicos y las preguntas de investigación que esta tesis doctoral busca abordar en el contexto de la transformación digital de los sistemas industriales, enfocándose particularmente en la interoperabilidad y el enfoque centrado en las personas.

### 2.1 Objetivos

#### 2.1.1 Objetivo General

La tesis doctoral tiene como objetivo principal explorar el impacto de la aplicación de la Web Semántica y la implementación de estándares de interoperabilidad en tecnologías de datos para facilitar la colaboración entre humanos y máquinas en los procesos de transformación digital industrial, enfatizando siempre un enfoque centrado en el ser humano.

#### 2.1.2 Objetivos Específicos

**O1.** Evaluar detalladamente el impacto y la eficacia de los estándares de interoperabilidad, específicamente aquellos relacionados con la Web Semántica, en la optimización de la eficiencia, la mejora de la seguridad y la sostenibilidad en entornos industriales.

**O2.** Estudiar cómo estos estándares de interoperabilidad pueden facilitar la integración del trabajador en los procesos de transformación digital.

**O3.** Proponer y desarrollar un componente adaptable para superar la fragmentación de la interoperabilidad semántica en los procesos de transformación digital.

**O4.** Explorar el papel de la colaboración humano-máquina en la mejora de la experiencia laboral y en la promoción de un entorno industrial más eficiente y seguro e interoperable.

#### 2.1.3 Hipótesis de la investigación

**H1.** La Web Semántica, junto con estándares de interoperabilidad en tecnologías de datos, posee un potencial significativo para facilitar la colaboración entre humanos y máquinas, mejorando la eficiencia y la seguridad en la industria. Este enfoque asegura que el proceso de transformación digital siempre mantenga al ser humano en el centro de sus prioridades.

**H2.** La implementación de estándares de interoperabilidad, complementados con la aplicación de tecnologías de la Web Semántica, puede facilitar de manera significativa la integración del trabajador en los procesos de transformación digital. Esto incrementa notablemente su productividad y adaptabilidad a nuevos sistemas y tecnologías.

**H3.** La colaboración humano-máquina, basada en estos estándares de interoperabilidad, puede mejorar la experiencia laboral al proporcionar herramientas más intuitivas y adaptativas, promoviendo un entorno industrial más eficiente, seguro y centrado en el trabajador.

**H4.** El desarrollo de un componente adaptable puede superar la fragmentación de la interoperabilidad semántica en los procesos de transformación digital, proporcionando una solución cohesiva que integre diversas tecnologías y facilite la comunicación entre sistemas heterogéneos.

## 2.2 Preguntas de Investigación

**PI.1** ¿Cómo pueden los estándares de interoperabilidad, complementados con tecnologías de la Web Semántica, mejorar la eficiencia y la seguridad en los procesos industriales?

**PI.2** ¿Cómo estos estándares de interoperabilidad pueden facilitar la integración del trabajador en los procesos de transformación digital?

**PI.3** ¿Cuál es el impacto de la colaboración humano-máquina en la experiencia laboral y en la creación de un entorno industrial más eficiente y seguro?

**PI.4** ¿Cómo se puede desarrollar y aplicar un componente adaptable para superar la fragmentación de la interoperabilidad semántica en los procesos de transformación digital?

# Capítulo 3

## Materiales y métodos

Este capítulo detalla los materiales y métodos utilizados en la investigación. Su objetivo es facilitar el entorno y los materiales para el desarrollo y evaluación del componente semántico diseñado, como objeto de esta tesis, para reducir la fragmentación en los procesos de TD, debida a la falta de la interoperabilidad entre sistemas y plataformas digitales diversas en entornos industriales. Con este componente se espera una mejora en la adaptabilidad de los mismos, con foco en los trabajadores. Se describen los recursos tecnológicos, el software relacionado, y los procedimientos metodológicos adoptados, enfocándose en cómo estos contribuyen al objetivo de la tesis de fomentar una industria más centrada en el humano.

### 3.1 Proyecto SHOP4CF

El proyecto SHOP4CF (Smart Human Oriented Platform for Connected Factories) es una iniciativa financiada por la UE dentro del programa marco Horizon 2020. Tiene como objetivo desarrollar una infraestructura única para la implementación conveniente de aplicaciones industriales centradas en el ser humano. SHOP4CF sostiene que las personas no deben ser reemplazadas por procesos automatizados, sino que pueden adquirir nueva relevancia mediante el uso de sus habilidades individuales dentro de la fábrica. Por lo tanto, las nuevas tecnologías deben ser utilizadas para desarrollar procesos que, aun mejorando la eficacia y la calidad del producto, se centren en el trabajador (humano) mejorando su bienestar y eficiencia. Este enfoque subraya la importancia de complementar la automatización de los procesos industriales con las capacidades humanas específicas, como la toma de decisiones críticas, la creatividad y la capacidad de resolución de problemas, promoviendo así una colaboración efectiva entre humanos y máquinas en entornos de fabricación. Al integrar estas habilidades humanas únicas con la eficiencia y precisión de las máquinas, se fomenta un ambiente de trabajo más dinámico y adaptativo, que no solo mejora la productividad, sino que también asegura una mayor satisfacción y seguridad laboral en la industria 4.0 (SHOP4CF Consortium, [2020](#))

Asimismo, SHOP4CF emerge como un pilar esencial en el contexto de esta investigación doctoral, representando un modelo vanguardista para democratizar la TD en las pymes industriales. Mediante la promoción de tecnologías accesibles que abogan por una transformación digital centrada en el trabajador, SHOP4CF persigue facilitar un acceso equitativo a las herramientas digitales, permitiendo así a las pymes superar los desafíos de interoperabilidad y fragmentación. Este proyecto subraya la importancia de adaptar

la digitalización a las necesidades humanas, asegurando que la tecnología actúe como un amplificador de las capacidades humanas, no solo en términos de bienestar y eficiencia, sino también fomentando la creatividad y otros valores intrínsecamente humanos que son cruciales en la transición hacia la Industria 5.0.

Al alinearse con los principios de SHOP4CF, la presente investigación se propone como un aporte evolutivo en este campo, al enfatizar la democratización de los procesos de TD. Se busca desarrollar y validar soluciones que no solo mejoren la interoperabilidad y cohesión digital en las pymes a nivel de proceso, sino que también promuevan un ambiente laboral donde la creatividad, la inclusión y el bienestar de los trabajadores sean pilares fundamentales. De esta manera, la investigación contribuye significativamente a la visión de una Industria 5.0 humanizada, donde la tecnología y la innovación digital se armonizan con los valores y aspiraciones humanas, creando ecosistemas industriales más resilientes, sostenibles y centrados en el ser humano.

SHOP4CF ha desempeñado un papel esencial como entorno para la recogida de requisitos, el testeo y la validación del componente semántico de esta tesis, proporcionando un marco único para abordar desafíos de interoperabilidad y fragmentación en los procesos de transformación digital. A través de la exploración en este proyecto, se identificaron barreras claves relacionadas con la falta de comunicación efectiva y interoperabilidad entre sistemas dispares, lo que impulsó el desarrollo de soluciones innovadoras.

Entre las innovaciones propuestas mediante SHOP4CF, destacan las barreras de interoperabilidad y la necesidad de entornos de trabajo más inclusivos y adaptativos. Esto condujo al desarrollo del componente semántico diseñado para facilitar la interoperabilidad entre sistemas. Una mayor flexibilidad en la interoperabilidad y un intercambio de datos más eficaz, tiene el potencial de mejorar los procesos, desde el punto de vista del trabajador y no del producto, mejorando así la experiencia laboral y la eficiencia de producción.

Con el propósito de comprobar si el componente no solo mejora la interoperabilidad entre sistemas, sino que también simplifica la implementación de servicios alineados con la industria 5.0, se realizó una validación en contextos industriales reales a través de pilotos específicos. Destacan el piloto de Arçelik, que incorporó el componente en su red de fábricas de lavadoras para facilitar el mantenimiento de equipos mediante asistencia remota con realidad aumentada, y el de Bosch en Madrid, donde se buscó mejorar la ergonomía y reducir la carga cognitiva en el ensamblaje manual. Esta validación confirma que el componente no solo es eficaz y útil, sino que además es sencillo de implementar en diversos entornos, demostrando su viabilidad y facilidad de adopción.

El proyecto no solo ofreció un entorno real para validar el componente desarrollado, sino que también permitió evaluar su impacto en la experiencia laboral y la eficiencia productiva. Se ha desarrollado y validado una metodología propia, que se describe en los siguientes párrafos, enfocada en democratizar la transformación digital. Esta metodología facilita el acceso a tecnologías que promueven una transformación digital centrada en el trabajador, resaltando el bienestar, la eficiencia y la creatividad, en consonancia con los principios de la industria 5.0.

La colaboración dentro de SHOP4CF ha sido crucial para definir las direcciones de investigación y establecer las bases metodológicas y técnicas esenciales para el desarrollo de soluciones tecnológicas vanguardistas. Este enfoque colaborativo ha permitido superar desafíos tanto técnicos como humanos que las pymes enfrentan en su transición hacia la

digitalización, contribuyendo de manera significativa hacia la realización de una visión industrial más centrada en el ser humano, sostenible y resiliente.

## 3.2 Herramientas para el desarrollo del Componente Semántico

En el marco de este trabajo, se profundiza en el desarrollo de un componente clave para la interoperabilidad semántica: el WoT-IL (Web of Things - Interoperability Layer) Este componente es piedra angular para abordar los desafíos de fragmentación en la interoperabilidad semántica, los cuales fueron introducidos en la subsección de Interoperabilidad Semántica del capítulo 1. Centrándose en fortalecer un entorno industrial que prioriza la humanización, seguridad y eficiencia, WoT-IL promueve la integración efectiva de tecnologías avanzadas y la adhesión a estándares abiertos. Su objetivo es facilitar una sinergia mejorada entre humanos y máquinas, potenciando la adaptabilidad y personalización en los procesos de producción industrial. Este esfuerzo se sustenta en una selección cuidadosa de herramientas y tecnologías, escogidas por su probada eficacia en la implementación de soluciones interoperables y centradas en el ser humano, que se alinean con los principios de interoperabilidad semántica discutidos previamente.

En el desarrollo de WoT-IL, se seleccionaron estratégicamente herramientas y tecnologías esenciales para alcanzar la interoperabilidad efectiva y la integración centrada en el ser humano dentro de entornos industriales digitales. Este conjunto de herramientas no solo permitió la comunicación fluida entre sistemas y estándares industriales dispares, sino que también permitió la adaptación flexible a requerimientos específicos y emergentes de la industria. A continuación, se detalla un resumen de las herramientas y tecnologías empleadas, destacando su papel vital en la facilitación del desarrollo de soluciones interoperables que mejoran la interacción humano-máquina y contribuyen a la personalización y eficiencia en la producción.

La Tabla 3.1 resume las herramientas y tecnologías esenciales empleadas en el desarrollo del componente WoT-IL, destacando su propósito específico y cómo contribuyen conjuntamente al proyecto. Cada herramienta se seleccionó cuidadosamente por su capacidad para abordar aspectos específicos del desarrollo, desde la conexión directa con sistemas industriales hasta la integración y publicación de datos en formatos estandarizados. La sinergia entre estas tecnologías facilita la creación de soluciones que no solo son interoperables sino también adaptativas y centradas en el ser humano, alineando el proyecto con los objetivos de transformación digital y mejora en la eficiencia y seguridad industrial. Esta combinación tecnológica subraya la importancia de seleccionar herramientas adecuadas para abordar los retos específicos de interoperabilidad y centrado en el humano en entornos industriales modernos.

**Tabla 3.1:** Herramientas y Tecnologías Utilizadas

Herramienta/Tecnología	Descripción	Propósito en el Proyecto
<b>OPC UA</b>	Protocolo de comunicación industrial estandarizado que facilita la interoperabilidad entre distintos sistemas de automatización y control industrial (ver sección 1.2.6).	Se utiliza como la base para la adquisición de datos y su estandarización, permitiendo una comunicación efectiva y segura entre dispositivos y sistemas dentro del entorno industrial.
<b>FIWARE Context Broker</b>	Una plataforma de gestión de contextos en tiempo real que actúa como un intermediario para recolectar, actualizar y consultar información sobre el estado actual de entidades del entorno IoT (ver sección 1.2.5).	Se emplea para facilitar la creación, gestión y uso inteligente de entidades FIWARE, mejorando así la interoperabilidad y la capacidad de respuesta en entornos dinámicos.
<b>Web of Things (WoT)</b>	Marco de estandarización que promueve la interoperabilidad en Internet de las Cosas (IoT) mediante la descripción de interfaces de dispositivos de forma estandarizada.	Permite la descripción de TDs y su publicación, facilitando la interoperabilidad entre diferentes dispositivos y sistemas IoT. Esta tecnología se discute con mayor profundidad en la subsección . <sup>E1</sup> estándar Web of Things" del Capítulo 1.
<b>Contenedores Docker</b>	Plataforma que utiliza la tecnología de contenedores para permitir que las aplicaciones se empaqueten con todas sus dependencias y se ejecuten de manera uniforme en cualquier entorno .	Proporciona un método eficiente para el despliegue y la gestión de componentes de software, asegurando la portabilidad y la coherencia entre diferentes entornos de desarrollo, prueba y producción. Este enfoque es crucial para la agilidad y escalabilidad del desarrollo de soluciones en este proyecto.
<b>Node-RED</b>	Herramienta de programación visual basada en flujos que facilita la conexión entre dispositivos de hardware, APIs y servicios online de manera intuitiva y flexible .	Utilizada para simular los servidores OPC UA durante el desarrollo y las pruebas de laboratorio, permitiendo una integración y orquestación eficaz de flujos de datos y servicios, lo que es esencial para el prototipado rápido y la experimentación en el proyecto.

### 3.3 Métodos de Desarrollo

Para desarrollar el componente semántico WoT-IL se unieron dos diferentes enfoques. Por un lado, se adoptó una perspectiva metodológica enfocada en la interoperabilidad dentro de entornos industriales. Este proceso se basó en la identificación y mapeo de las especificaciones de OPC UA a modelos semánticos compatibles con WoT y FIWARE. Se inició con un análisis detallado de las estructuras de datos de OPC UA, identificando las correspondencias semánticas con los modelos de datos de WoT y FIWARE. Este análisis condujo al diseño de algoritmos para la transformación automática de datos, asegurando la coherencia y la precisión en el mapeo semántico.

Se emplearon entornos de desarrollo integrados (IDE) y herramientas de modelado para diseñar y probar los algoritmos de mapeo. La implementación se realizó en lenguajes de programación compatibles con los entornos de ejecución de WoT y FIWARE, utilizando bibliotecas y marcos de trabajo específicos para facilitar la comunicación con dispositivos OPC UA y la integración con plataformas IoT.

Por otro lado, también se utilizó una metodología de desarrollo iterativa centrada en el usuario, alineada con la arquitectura de referencia especificada por el proyecto SHOP4CF. Esta estrategia permitió enfocarse en las necesidades reales de los trabajadores dentro de entornos industriales, asegurando que las soluciones desarrolladas no solo fueran técnicamente viables sino también útiles y accesibles para el usuario final.

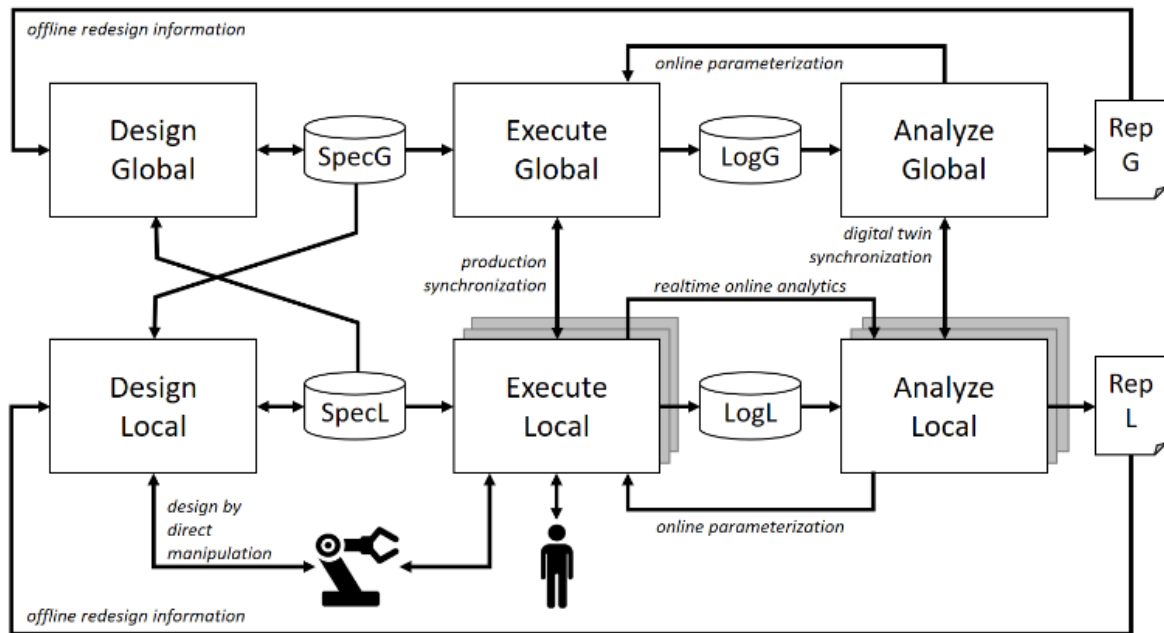
La implementación de esta segunda metodología comenzó con la identificación de requisitos a través de la interacción directa con entornos industriales y análisis de las necesidades de interoperabilidad. A partir de ahí, se diseñaron y desarrollaron prototipos iniciales, que se sometieron a pruebas y validación continuas en escenarios reales para garantizar su efectividad y usabilidad. Este enfoque iterativo permitió realizar ajustes y mejoras basados en el *feedback* directo de los usuarios, asegurando que el componente final estuviera bien alineado con los objetivos del proyecto SHOP4CF de promover entornos de trabajo más humanos y eficientes.

#### 3.3.1 Arquitectura de SHOP4CF

La arquitectura de software lógica de alto nivel de SHOP4CF proporcionó un enfoque holístico para el desarrollo del componente propuesto. Esta arquitectura se organiza funcionalmente en seis subsistemas, cada uno abordando diferentes fases y niveles del proceso de fabricación: desde el diseño hasta la ejecución y análisis posterior. Esencialmente, la arquitectura distingue entre la funcionalidad a nivel local, apoyando células de trabajo individuales, y a nivel global, proporcionando soporte a través de células de trabajo (Zimniewicz et al., 2020).

#### Integración de Interfaces de Alto Nivel

La integración de WoT-IL dentro de esta arquitectura implica un enfoque detallado en las interfaces de alto nivel, como se presenta en la Figura 3.1. Estas interfaces facilitan la comunicación directa e indirecta entre los subsistemas, manejando tanto interacciones síncronas como asíncronas.

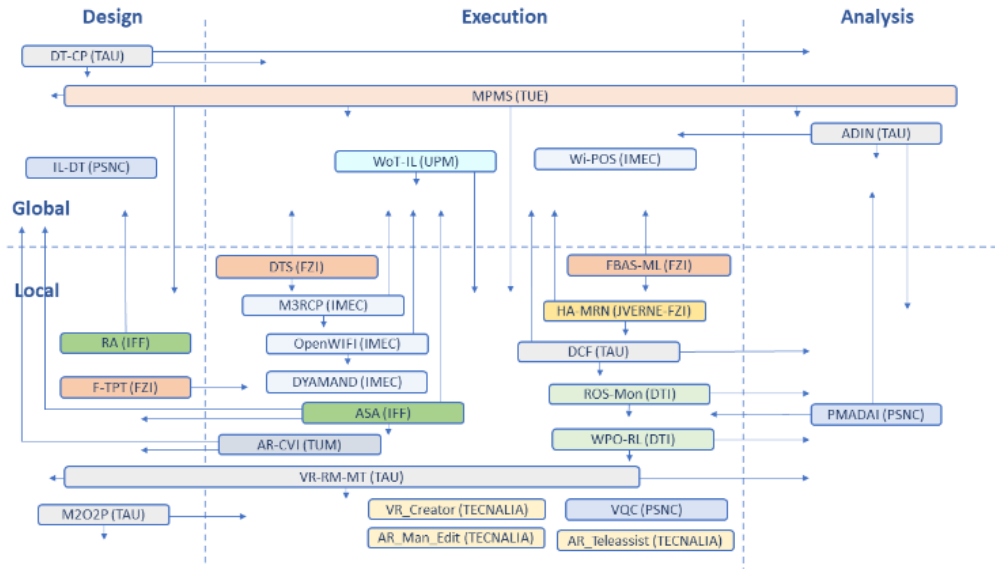


**Figura 3.1:** Arquitectura lógica de software de alto nivel con interfaces. Fuente: (Zimniewicz et al., 2021)

Por ejemplo, la interacción del subsistema Execute Local con los trabajadores humanos y sistemas robóticos refleja la importancia de diseñar interfaces intuitivas y eficientes. Estas interfaces no solo promueven la ejecución precisa de pasos de fabricación sino también facilitan un diseño adaptable mediante la configuración de software para satisfacer las necesidades específicas del piso de fábrica.

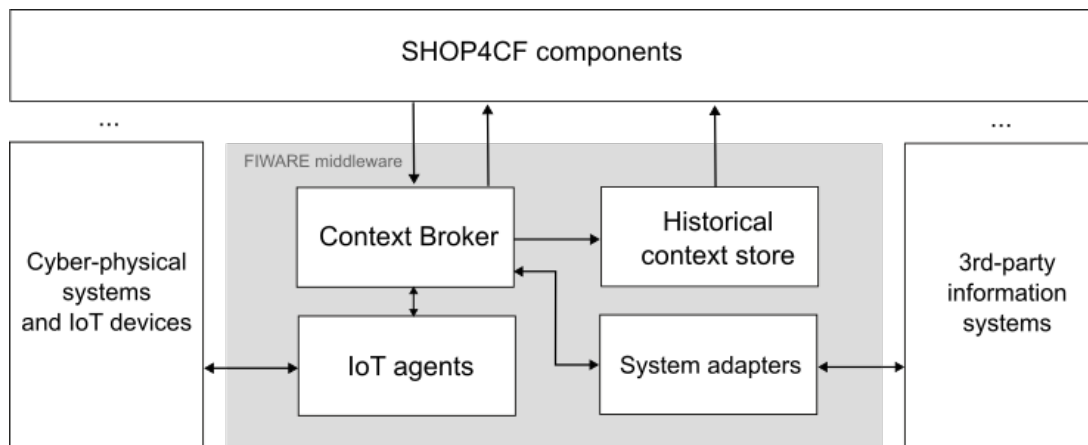
### Posicionamiento de Componentes y Mapeo de Escenarios

La asignación de los componentes de SHOP4CF a esta arquitectura, mostrada en la Figura 8, establece una estructura clave que guía el desarrollo de WoT-IL. La integración horizontal y vertical con otros componentes subraya la interoperabilidad y la capacidad de adaptación de nuestro enfoque.



**Figura 3.2:** Mapeo de los componentes de SHOP4CF a la arquitectura lógica de software de alto nivel. Fuente: (Zimniewicz et al., 2021)

Además, la Figura 3.3 destaca cómo se logra la interoperabilidad entre componentes en los escenarios piloto definidos inicialmente, en donde WoT-IL es considerado dentro de los System adapters, sirviendo como un ejemplo concreto de diseño funcional de un sistema SHOP4CF. Esta interoperabilidad es crucial para superar los desafíos de fragmentación en la interoperabilidad, alineándose con nuestro objetivo de desarrollar un entorno industrial más humano y eficiente.



**Figura 3.3:** SHOP4CF - Arquitectura lógica de middleware de alto nivel. Fuente: (Zimniewicz et al., 2021)

Al unir estos enfoques metodológicos y técnicos, no solo resaltamos la importancia de la interoperabilidad técnica, sino también la necesidad de considerar las interacciones humanas en el diseño de sistemas industriales. Este enfoque comprensivo asegura que el componente esté bien integrado dentro del ecosistema más amplio de SHOP4CF, promoviendo entornos de trabajo más inclusivos, seguros y adaptativos.

### 3.3.2 Metodología Centrada en el Usuario (*User-Centered Design*, UCD)

Aunque los usuarios no interactúan directamente con el componente desarrollado en esta tesis, su principal objetivo es facilitar su uso. Para lograrlo, se adoptó una Metodología UCD en el desarrollo del componente WoT-IL. Esta metodología asegura que el componente no solo cumpla con los requisitos técnicos, sino que también se alinee con las necesidades y expectativas de los usuarios finales. UCD es un enfoque iterativo que pone al usuario en el centro del proceso de diseño y desarrollo, garantizando que sus experiencias y necesidades sean consideradas en todas las fases del proyecto (Wallach y Scholz, 2012).

El enfoque UCD se basa en varios principios clave que fueron integrados en el desarrollo de WoT-IL (Walden et al., 2020, Pratt y Nunes, 2012):

- **Comprensión del Contexto de Uso:** Antes de iniciar el desarrollo, se llevaron a cabo estudios para entender el entorno industrial y las tareas que los usuarios realizarían con WoT-IL. Esto incluyó entrevistas y observaciones en plantas de producción, lo cual permitió identificar las necesidades y desafíos específicos de los operarios, técnicos de mantenimiento y desarrolladores.
- **Participación Activa de los Usuarios:** Los usuarios finales participaron activamente en todas las etapas del desarrollo. Se organizaron talleres y sesiones de retroalimentación donde los usuarios pudieron interactuar con prototipos y versiones preliminares del componente, proporcionando comentarios valiosos que guiaron las iteraciones de diseño.
- **Diseño Iterativo:** El desarrollo de WoT-IL siguió un ciclo iterativo, en el que se crearon y evaluaron prototipos sucesivos. Cada iteración incorporó mejoras basadas en la retroalimentación de los usuarios, lo que permitió refinar continuamente el diseño y la funcionalidad del componente. Esto garantizó que el producto final fuera intuitivo y eficaz en el entorno industrial.
- **Enfoque en la Usabilidad:** Se realizaron pruebas de usabilidad para evaluar cómo los usuarios interactuaban con WoT-IL. Estas pruebas ayudaron a identificar problemas de uso y áreas de mejora, asegurando que el componente fuera fácil de usar y aprender. Las métricas de usabilidad evaluadas incluyeron la eficiencia, la efectividad y la satisfacción del usuario.

La implementación de UCD en WoT-IL se llevó a cabo en varias fases, cada una de las cuales integró técnicas y prácticas específicas para asegurar la alineación con las necesidades de los usuarios:

1. **Investigación del Usuario:** Se realizaron estudios de campo en fábricas y plantas de producción para entender el contexto de uso y las necesidades específicas de los usuarios. Se recogieron datos cualitativos mediante entrevistas y observaciones directas, que fueron analizados para identificar patrones y requisitos clave.
2. **Prototipado y Evaluación:** Se desarrollaron prototipos de baja y alta fidelidad que fueron evaluados por los usuarios en entornos de prueba. Las evaluaciones se realizaron en sesiones controladas donde los usuarios interactuaron con los prototipos mientras se recogían datos sobre su desempeño y experiencia. Los resultados de estas evaluaciones guiaron las iteraciones de diseño.

3. **Integración de Feedback:** Cada iteración del prototipo incorporó el feedback de los usuarios, lo que permitió ajustes continuos y mejoras incrementales. Este enfoque iterativo aseguró que el componente evolucionara en respuesta directa a las necesidades y expectativas de los usuarios, mejorando su usabilidad y efectividad.
4. **Pruebas de Usabilidad:** Se realizaron pruebas de usabilidad en cada fase del desarrollo para evaluar la facilidad de uso del componente. Estas pruebas incluyeron la observación directa de los usuarios, cuestionarios de satisfacción y análisis de métricas de rendimiento, como el tiempo para completar tareas y la tasa de errores.

La adopción de la Metodología Centrada en el Usuario no solo mejoró la experiencia del usuario final con WoT-IL, sino que también contribuyó significativamente a su éxito en entornos industriales reales. Al garantizar que el diseño y la funcionalidad del componente se alinearan estrechamente con las necesidades de los usuarios, se logró una integración más efectiva y una aceptación más rápida en el *shopfloor* industrial. Este enfoque es holístico al desarrollo de SHOP4CF y será el eje de la evaluación y validación de todos los componentes desarrollado en el marco del proyecto, incluido el presentado en esta tesis. Estos métodos de validación se presentan de forma detallada en la sección 3.4.

### 3.3.3 Implementación de Metodologías Ágiles en el Desarrollo de WoT-IL

Complementando la Metodología UCD descrita en la sección anterior, el desarrollo de WoT-IL incorporó también prácticas de metodologías ágiles. Esta integración se realizó con el fin de adaptarse rápidamente a las cambiantes necesidades del entorno industrial y fomentar una colaboración efectiva entre todos los *stakeholders* del proyecto. La metodología ágil enfatiza la flexibilidad, la iteración rápida y la capacidad de responder a la retroalimentación en tiempo real, lo que es crucial en proyectos tecnológicos dinámicos y centrados en el usuario (Bird, 2010).

La implementación de las metodologías ágiles se diseñó para fortalecer y amplificar los principios de UCD, asegurando que el desarrollo del componente WoT-IL no solo fuera técnicamente adecuado sino también alineado con las expectativas y necesidades reales de los usuarios finales. La combinación de estas metodologías permitió un enfoque de desarrollo más holístico y centrado en el usuario, crucial para la aceptación y eficacia del componente en ambientes industriales.

Para una mejor comprensión, se enumeran a continuación los principios clave de las metodologías ágiles utilizados en el desarrollo de WoT-IL (Brhel et al., 2015):

- **Iteración y Entrega Incremental:** El desarrollo se estructuró en ciclos de desarrollo cortos que facilitan la revisión continua del progreso y la integración temprana de retroalimentación. Este enfoque iterativo asegura que cada incremento del componente WoT-IL refleje las mejoras basadas en evaluaciones reales y observaciones detalladas de la interacción del usuario.
- **Flexibilidad en la Planificación:** La capacidad de modificar rápidamente los planes de desarrollo en respuesta a la retroalimentación de los usuarios o cambios en el entorno de producción industrial es una ventaja clave de la metodología ágil. Esto asegura que el componente desarrollado permanezca relevante y efectivo ante los desafíos emergentes y las oportunidades de innovación.

- **Colaboración Continua:** El desarrollo ágil promueve una colaboración estrecha entre todos los actores del proyecto, incluyendo desarrolladores, usuarios finales, y administradores del proyecto, garantizando que todas las perspectivas sean consideradas y que el producto final sea integralmente adecuado para su uso previsto.

La adopción de estas metodologías no solo mejoró la alineación del desarrollo de WoT-IL con las necesidades del usuario, sino que también aceleró la integración del componente en el entorno de producción industrial. La eficiencia operativa y la satisfacción del usuario final se vieron directamente beneficiadas por este enfoque, lo cual se evidenció en la rápida adopción y la positiva recepción del componente en el *shopfloor*.

La aplicación de metodologías ágiles sirve como un caso de estudio fundamental sobre cómo la flexibilidad y adaptabilidad en el desarrollo pueden resultar en implementaciones tecnológicas más exitosas y receptivas a las condiciones dinámicas de la industria moderna.

## 3.4 Métodos de Evaluación y Validación

En esta sección se describen los procesos de evaluación y validación llevados a cabo para garantizar la eficacia y funcionalidad del componente semántico desarrollado. El objetivo de la evaluación fue valorar las capacidades de interoperabilidad del componente, su integración con los sistemas industriales y la mejora de la colaboración hombre-máquina. Así pues, para la evaluación del componente se ha usado una serie de métodos mixtos orientados a validar la solución desde el punto de vista técnico y humano de una forma incremental.

### 3.4.1 Herramientas y Metodologías de Evaluación

Esta sección describe los procedimientos adoptados para evaluar la funcionalidad y la interoperabilidad del componente WoT-IL. Asimismo, se detalla tanto los métodos experimentales como los criterios de evaluación utilizados, enfatizando la integración del componente en entornos reales.

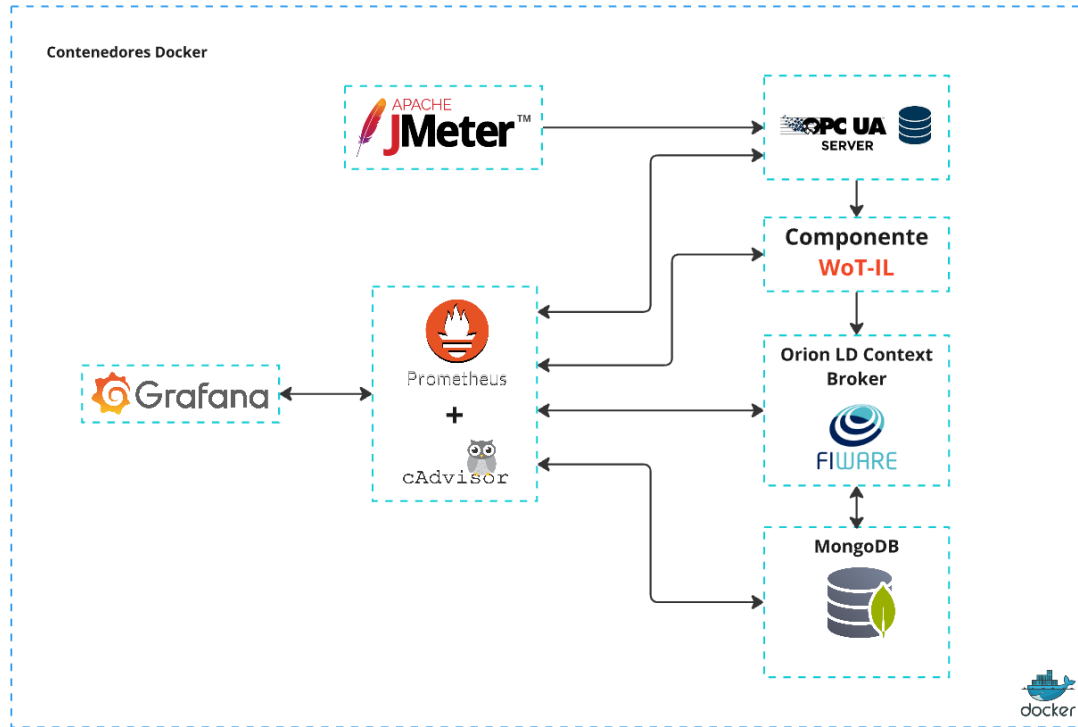
#### Pruebas de laboratorio

Las pruebas de laboratorio se centraron en validar la funcionalidad y la interoperabilidad del componente WoT-IL, empleando un entorno controlado que simula condiciones industriales reales. Para simular el flujo de mensajes y peticiones en una planta industrial, se configuró un servidor OPC UA, similar a los que hay en entornos industriales, para emular las operaciones de los dispositivos de la planta y evaluar la eficacia del mapeo semántico y la transmisión de datos. Asimismo, se desplegó una implementación del Context Broker de FIWARE que incluye una base de datos MongoDB para almacenar las Entidades FIWARE de prueba.

Por otro lado, herramientas como Grafana(Grafana Labs, 2024) y Prometheus(Prometheus.io, 2024) se integraron para monitorear el correcto funcionamiento y el rendimiento del componente desarrollado en tiempo real, mientras que cAdvisor(Google, 2024) se utilizó para acceder a métricas detalladas sobre el uso de recursos tanto del servidor como del componente. Finalmente, Apache JMeter(Apache Software Foundation, 2024) se empleó para simular cargas de trabajo variables, como las que se podría encontrar el componente en un

entorno real y así poder evaluar la capacidad de respuesta del componente bajo diversas condiciones.

En la Figura 3.4 se puede observar el diagrama del entorno diseñado para las pruebas de laboratorio. En este diagrama se encuentran los componentes y herramientas antes descritas, permitiendo identificar como se relacionan entre ellos.



**Figura 3.4:** Diagrama del Entorno de Pruebas para la Validación de la Funcionalidad e Interoperabilidad del Componente WoT-IL

### Integración y validación en entornos reales

La evaluación de WoT-IL en el proyecto SHOP4CF ilustra un enfoque innovador hacia la interoperabilidad en entornos industriales, destacando la integración efectiva entre humanos y sistemas automatizados. Este análisis, basado en una revisión exhaustiva de las soluciones tecnológicas desarrolladas (SHOP4CF Consortium, 2020), muestra cómo WoT-IL promueve una colaboración fluida y efectiva entre diversos componentes y actores, alineando la usabilidad, adaptabilidad y escalabilidad con los principios de la Industria 5.0 (Abril-Jimenez et al., 2022). Tras la validación en laboratorio y entornos simulados, el componente se evaluó en condiciones reales de trabajo bajo condiciones controladas. Para las pruebas de campo, el componente WoT-IL se integró en escenarios industriales reales dentro de los pilotos previstos en el proyecto SHOP4CF, específicamente en los escenarios de validación antes mencionados que pasan a describirse en detalle:

#### Escenario de Validación 1: Arçelik AS Cayirova Kampusu

En la planta de lavadoras involucrada en este escenario de validación de la empresa Arçelik, se trataba de optimizar la respuesta ante errores en la cadena de producción que pudiesen suponer un retraso o peligro para la seguridad de los trabajadores. El piloto de Arçelik

se centró en ingenieros expertos ubicados en la planta de Çayırova/Istambul, quienes brindaron apoyo remoto a trabajadores en otras plantas de producción de lavadoras. La lista de requisitos para los distintos casos de uso en este piloto se actualizó dinámicamente durante la fase de definición y diseño, con un trabajo colaborativo continuo entre los trabajadores de las plantas de Arçelik, responsables del piloto a nivel de piloto y consorcio, coordinadores de tareas de evaluación y desarrolladores de componentes. Varios factores externos impactaron profundamente en la definición de los casos de uso, lo que, por un lado, retrasó el proceso de definición y, por otro, afectó los planes iniciales del piloto, requiriendo una profunda adaptación a la situación actual, incorporando nuevos requisitos y descartando otros. WoT-IL ha sido implementado en el Caso de Uso 2, cuyo objetivo es mejorar la comunicación y el soporte técnico remoto. Este enfoque resalta los siguientes beneficios clave orientados al ser humano:

- Optimización del proceso de mantenimiento, reduciendo el tiempo necesario para identificar y resolver problemas.
- Reducción de esfuerzos de ingeniería adicionales y costos asociados, disminuyendo la necesidad de soporte directo en el sitio.
- Minimización de riesgos para los trabajadores al realizar tareas de mantenimiento, ilustrando visualmente las amenazas potenciales.
- Uso seguro y eficiente de recursos humanos expertos, reduciendo malentendidos debido a diferencias lingüísticas y culturales.

El desarrollo de este Caso de Uso fue posible mediante la publicación de datos de máquinas en el Context Broker y en el servidor WoT. Este enfoque permitió a los técnicos acceder a las variables de las máquinas para proporcionar soporte técnico a distancia, mejorando la eficiencia en la resolución de problemas y el mantenimiento preventivo. Esta estrategia destacó la capacidad de integrar soluciones tecnológicas avanzadas para facilitar operaciones más complejas, reflejando la innovación y adaptabilidad de WoT-IL en contextos industriales.

En este caso, y para complementar la validación de la versatilidad del componente desarrollado, el escenario trata de validar la efectividad del componente para publicar la información relevante de los sensores y dispositivos embebidos en la cadena de producción y con esta información facilitar la asistencia remota mediante el acceso a variables estado de las máquinas involucradas. Esto facilitaría la asistencia remota a los operarios a través de aplicaciones de realidad aumentada evitando desplazamientos innecesarios y mejorando la seguridad de los trabajadores al poder recibir siempre asistencia en caso de detección de problemas.

### **Escenario de Validación 2: Robert Bosch España Fábrica Madrid, S.A.U.**

En la planta industrial de Bosch, se llevó a cabo una evaluación del componente WoT-IL para determinar su eficacia en publicar información proveniente de diversas fuentes dentro de un escenario destinado a la automatización de cadenas de producción que operan continuamente, 24/7, pero con ritmos de trabajo variables y demandas inesperadas.

El piloto de BOSCH en esta planta se centra en la fabricación de una variedad de componentes electrónicos para automóviles, incluidos airbags y sensores de asistencia al estacionamiento. Hasta el momento de redactar este documento, no se han registrado

cambios significativos ni desviaciones en el proceso. La integración de los componentes necesarios para el inicio del despliegue del piloto comenzó en el último trimestre de 2021, incluyendo sesiones de integración virtual y física, con la participación de equipos de desarrolladores de varias instituciones y BOSCH como responsable del piloto. Aunque el despliegue y las pruebas de FIWARE requirieron varios ajustes por errores en la distribución de puertos, se encontraron soluciones y finalmente se logró con éxito la integración de todos los componentes requeridos.

El objetivo del piloto SHOP4CF es implementar un brazo robótico único sobre una plataforma móvil automatizada (AGV), compartido eficazmente entre las líneas de producción, con la integración de WoT-IL para optimizar la gestión de datos y la organización de tareas. Este enfoque se anticipa a ofrecer beneficios centrados en el ser humano:

- Permitir que los trabajadores se enfoquen en sus tareas principales sin asumir tareas adicionales.
- Aliviar el estrés de los trabajadores causado por la necesidad de programar tareas adicionales ad hoc fuera de sus tareas principales.
- Ofrecer a los ingenieros de producción una visión general de cómo se utilizan los recursos automatizados y humanos durante la producción.

Este escenario demuestra la viabilidad y el impacto positivo de mejorar la interoperabilidad y la eficiencia operativa en entornos industriales, subrayando la importancia de la adaptabilidad y la respuesta dinámica a las demandas de producción.

En este contexto, el componente desarrollado debe detectar, traducir y publicar la información procedente de diversos sensores en el estándar adecuado. Esta capacidad es esencial para permitir que un componente orquestador gestione dinámicamente las tareas de los robots y los operadores humanos asignados a la línea de producción, basándose en los datos de las máquinas en tiempo real.

En conjunto y de forma coordinada, las pruebas realizadas en estos dos escenarios de validación permitieron verificar no solo la mejora en la interoperabilidad entre los componentes involucrados en el escenario, gracias al uso del componente desarrollado en el marco de este trabajo de investigación, sino también la eficiencia del mismo, en el manejo de estándares y su transformación para ser semánticamente interoperables. Además, se cuantificó su impacto en la mejora de la colaboración humano-máquina y la optimización de los procesos productivos

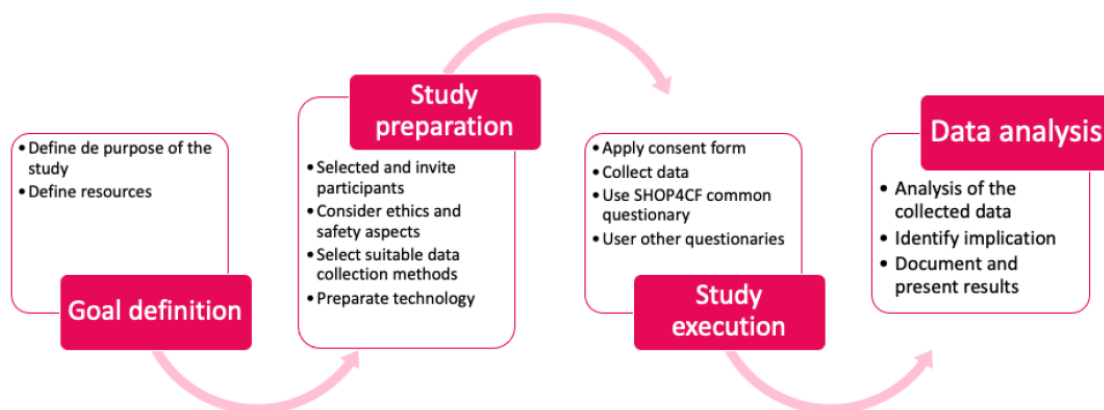
### 3.4.2 Evaluando la adaptabilidad al humano

La evaluación de la adaptabilidad al humano y su impacto en los trabajadores respecto a los objetivos perseguidos por la TD se realizó mediante tres tipos de herramientas que se describen a continuación

#### Marco de Evaluación General de SHOP4CF

En el contexto del proyecto SHOP4CF, se desarrolló un enfoque integral para evaluar las soluciones tecnológicas propuestas, centradas en mejorar la eficiencia y humanización de los procesos de fabricación. Este enfoque desarrollado en el Marco de Evaluación de SHOP4CF (Aromaa et al., 2020) a través de diversas herramientas, ofrece una metodología

robusta para la evaluación de las tecnologías desarrolladas dentro del proyecto. Este Marco de Evaluación proporciona las directrices para el análisis y la interpretación de los datos recogidos a través del cuestionario. Este marco se basa en criterios específicos para evaluar el impacto de las soluciones tecnológicas en el entorno de fabricación, como se puede ver en la Figura 3.5



**Figura 3.5:** Marco de evaluación de SHOP4CF (adaptado de los entregables del Paquete de Trabajo 2 de SHOP4CF). Fuente: (Aromaa et al., 2020)

La integración del Marco de Evaluación de SHOP4CF facilita una comprensión holística de los efectos de las soluciones tecnológicas en los procesos de fabricación. Esta metodología no solo permite identificar áreas de mejora sino también resaltar las fortalezas de las soluciones en términos de interoperabilidad, usabilidad, adaptabilidad y escalabilidad, garantizando así el alineamiento con los objetivos del proyecto de promover una industria más humana y eficiente.

En la fase inicial de definición de objetivos, se colaboró estrechamente para establecer los requisitos preliminares, propósitos de los pilotos, y condiciones posteriores, junto con la definición de casos de uso que se refinaron continuamente a medida que la plataforma del proyecto y sus componentes alcanzaron un estado más maduro. Dadas las circunstancias cambiantes en Europa (pandemia, crisis energética, etc.), los casos de uso se actualizaron acordemente y se definió un plan B. La preparación del estudio implicó la definición de metodologías de evaluación apropiadas, alineadas con el marco de evaluación de SHOP4CF y los objetivos específicos. La ejecución del estudio requirió establecer un proceso, manual o automático, para adquirir los datos necesarios, tarea que se llevó a cabo en colaboración con los desarrolladores. Finalmente, el análisis de datos buscó visualizar adecuadamente los resultados de la evaluación, basándose en el análisis de los datos recogidos. Este proceso combina pruebas técnicas y de usuario orientadas a la validación efectiva de los objetivos del sistema desarrollado a nivel técnico, de productividad y usuario.

### **Definición de Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) y Métodos de Medición**

En esta etapa, cada piloto trabajó en la definición del propósito de su estudio de evaluación individual, de acuerdo con sus problemas específicos, necesidades y desafíos, y planificando los recursos necesarios para llevar a cabo la definición, implementación y ejecución del piloto. La definición individual de los KPIs en cada piloto y su continua redefinición de acuerdo con las necesidades específicas de la industria constituyen la base del marco de evaluación de SHOP4CF. Se propusieron dos escenarios de evaluación (ver Tabla 3.2):

**Tabla 3.2:** Escenarios de evaluación propuestos

<b>Escenarios de Evaluación</b>	<b>Descripción</b>
<b>Evaluación inicial</b>	Proporciona información sobre la situación del piloto antes de la implementación de SHOP4CF.
<b>Implementación del proyecto SHOP4CF</b>	Proporciona información sobre la situación del piloto después de la implementación e integración de los componentes de SHOP4CF en los sitios piloto.

Dependiendo de la naturaleza de los KPIs definidos, se necesitaron diferentes métodos para recopilar la información requerida tanto al inicio como al final del piloto. Los KPIs se dividieron en cuatro categorías principales (ver Tabla 3.3):

**Tabla 3.3:** Categorías de los KPI

<b>Categoría de KPI</b>	<b>Descripción</b>
<b>Requisitos de integración</b>	Relacionados con la capacidad de los sistemas para integrarse.
<b>Funcionalidad</b>	Evaluación de las capacidades operativas de los sistemas implementados.
<b>Requisitos del proceso</b>	Medición de la eficiencia y efectividad de los procesos.
<b>Valores relacionados con el humano</b>	Enfocados en las percepciones y uso de la tecnología por parte de los usuarios.

Los métodos técnicos (como algoritmos y datos medibles recopilados mediante, por ejemplo, servicios RESTful) se utilizaron para recopilar datos sobre los requisitos de integración, funcionalidad y proceso. En algunos casos, el método inicial (en la línea base) fue manual y, debido a la integración de los componentes de SHOP4CF, se incluyó un método automático para recopilar los datos específicos. El valor relacionado con el humano se refiere principalmente a las percepciones y uso de la tecnología por parte de los usuarios, y se midieron a través de los cuestionarios correspondientes. Finalmente, los pilotos definieron un logro específico para cada uno de los KPIs, por ejemplo, una estimación de la reducción general como una medida de éxito que permite la generación de evidencia de la utilidad de la plataforma desplegada.

### **Proceso de Definición y Actualización de KPIs**

Se siguió un proceso iterativo en coordinación con los gerentes de los pilotos con el objetivo de definir criterios realmente exitosos, útiles no solo para los objetivos de cada piloto, sino también para la explotación futura y la generación de evidencia de SHOP4CF. Se compartió una hoja de cálculo colaborativa en línea con los gerentes de los pilotos respecto a los KPIs basados en la información previamente recopilada. Un ejemplo de esta hoja se

presenta en la Figura adjunta. El término de categoría tiene como objetivo proporcionar una descripción de alto nivel del tipo de KPI bajo cada una de las cuatro categorías descriptivas generales destacadas en la sección anterior. Esta información se describe en detalle en la sección de especificación de requisitos. La dimensión específica del KPI se describe en la definición del KPI. Finalmente, la metodología actual de recopilación de valor se describe en la metodología de evaluación de línea base.

La metodología de recolección de datos en la línea base no puede ser la misma que en la recopilación de datos durante el piloto, ya que la incorporación de los componentes de SHOP4CF permite la inclusión de medidas automáticas en algunos casos. Finalmente, la estimación del umbral indica los criterios de éxito para cada uno de los KPIs definidos.

### **Monitoreo de la Experiencia de Integración**

La plataforma SHOP4CF ofrece funcionalidades que pueden facilitar la digitalización de las pymes y las medianas empresas en el sector manufacturero. Para este fin, los componentes iniciales deben garantizar que puedan ser fácilmente desplegados en diferentes áreas y adaptarse sencillamente a las condiciones cambiantes en diferentes contextos. Con el fin de evidenciar la interoperabilidad y la capacidad de integración de los componentes propuestos durante la integración de los primeros prototipos en los sitios piloto, se realizó una encuesta entre los participantes del proyecto, con el objetivo de descubrir barreras durante estas sesiones de integración. Además, esta encuesta también recopiló información para alimentar los servicios de soporte de la plataforma, mejorar la documentación y mejorar los componentes mismos.

### **Evaluación de Factores Humanos**

La mejora de los factores humanos es un activo importante del proyecto. Por eso, la fase de evaluación implica la participación activa de los trabajadores en el proceso de evaluación a través de actividades específicas de demostración y validación, donde el trabajador tiene la oportunidad de evaluar prácticamente las soluciones desplegadas. Además del diseño y evaluación de los protocolos piloto, se planificó distribuir un cuestionario común para evaluar la experiencia del usuario, la aceptación del usuario, la usabilidad, la ergonomía, la seguridad y los aspectos éticos entre los trabajadores participantes al final del experimento.

### **El Cuestionario de Evaluación de SHOP4CF**

El Cuestionario de Evaluación de SHOP4CF (ver Anexo A) se diseñó con el objetivo de recopilar información directamente de los usuarios finales y otros actores relevantes sobre su experiencia y percepción de las soluciones tecnológicas implementadas. Este cuestionario incluye una serie de ítems que abordan los siguientes componentes clave:

- **Interoperabilidad:** Se evalúa mediante preguntas enfocadas en la capacidad de los componentes tecnológicos para comunicarse e integrarse con otros sistemas y dispositivos existentes en el entorno de producción.
- **Usabilidad:** Se investiga a través de ítems que exploran la facilidad de uso de las soluciones, incluyendo la intuitividad de las interfaces y la eficiencia en la realización de tareas.
- **Adaptabilidad:** Mediante preguntas diseñadas para entender la capacidad de las soluciones para ajustarse a cambios en los procesos de fabricación y en las necesidades del negocio.

- **Escalabilidad:** Se mide considerando preguntas sobre la capacidad de las soluciones para expandirse y adaptarse a un aumento en la demanda o en el volumen de producción.

### Método de Evaluación Comparativa

El método de evaluación comparativa, como se describe en estudios sobre digitalización centrada en el trabajador en entornos industriales (Abril-Jiménez et al., 2024), utiliza KPs para evaluar y comparar distintas soluciones tecnológicas implementadas. Esta metodología permite una evaluación cuantitativa de la eficacia, eficiencia y usabilidad de las tecnologías en función de varios criterios específicos. A continuación, se detallan los pasos principales de este método de evaluación:

#### Definición de KPIs

Los KPIs se seleccionan en función de los objetivos específicos del proyecto y las necesidades de los usuarios finales. En el contexto de SHOP4CF, los principales KPIs considerados son:

- **Eficiencia Operativa:** Medida de la productividad y optimización de los recursos en los procesos industriales.
- **Satisfacción del Usuario:** Evaluación de la aceptación y satisfacción de los usuarios finales con las soluciones tecnológicas implementadas.
- **Seguridad:** Medición del impacto de las tecnologías en la seguridad de los trabajadores y la reducción de riesgos laborales.
- **Adaptabilidad:** Capacidad de las soluciones para adaptarse a diferentes entornos operativos y cambios en los procesos productivos.

#### Recolección de Datos

La recolección de datos se realiza mediante la observación directa, encuestas y el uso de herramientas de monitoreo y análisis en tiempo real. Los datos recopilados proporcionan una visión integral del desempeño de las tecnologías bajo evaluación.

#### Análisis y Comparación

Los datos recopilados se analizan utilizando técnicas estadísticas y de análisis comparativo para identificar patrones y tendencias. Los KPIs se cuantifican y se comparan entre las distintas soluciones tecnológicas para determinar cuál ofrece el mejor rendimiento en función de los criterios establecidos.

#### Informe de Resultados

Finalmente, se elabora un informe detallado que presenta los resultados del análisis comparativo. Este informe incluye recomendaciones sobre las mejores prácticas y las tecnologías más adecuadas para su implementación en entornos industriales, basadas en los KPIs evaluados.

Esta metodología permite una evaluación estructurada y objetiva de las soluciones tecnológicas, facilitando la toma de decisiones informadas y la optimización de los procesos industriales.



# Capítulo 4

## Desarrollando WoT-IL: Un Enfoque Semántico para Mejorar la Interoperabilidad en la Transformación Digital

Como se introducido a lo largo de los capítulos anteriores, uno de los principales desafíos en la TD es la fragmentación tecnológica que dificulta la comunicación y el intercambio de datos entre diferentes dispositivos y sistemas en entornos industriales. El componente WoT-IL, desarrollado como fruto de la investigación descrita en esta tesis, aborda estas lagunas actuando como una capa de interoperabilidad que facilita esta interacción. Al permitir que distintas tecnologías trabajen juntas de manera cohesiva, WoT-IL desempeña un papel crucial en la creación de soluciones integradas y eficientes, apoyando la visión de una industria más inteligente, conectada y resiliente. La relevancia innovadora del componente WoT-IL radica en su capacidad para superar los desafíos presentados por la fragmentación tecnológica, facilitando así una transformación digital fluida y enfocada en el ser humano.

### 4.1 Fases de Desarrollo

El proceso de desarrollo de WoT-IL se llevó a cabo mediante la metodología centrada en el usuario descrita en la sección 3.3.2, que involucró una serie de iteraciones incrementales siguiendo un enfoque ágil, derivado del uso de metodologías ágiles descritas en la sección 3.3.3. Esto permitió que tanto los desarrolladores como los usuarios potenciales pudieran participar activamente en el proceso de evaluación y perfeccionamiento del componente. Aunque los operarios no utilizan directamente el componente WoT-IL, la agilidad que proporcionan sus funcionalidades se refleja claramente en la experiencia del usuario final. Por esta razón, resulta crucial involucrar a los trabajadores desde el inicio del diseño del sistema, para comprender qué objetivos debe cumplir el componente y cómo deben ejecutarse eficazmente.

En la Figura 4.1 se observan las fases del desarrollo seguidas, destacando desde la recogida de requisitos hasta la iteración final y mejora, garantizando así una integración efectiva y un ajuste continuo, basado en la retroalimentación de los usuarios.



**Figura 4.1:** Fases del Desarrollo de WoT-IL

Las iteraciones fueron cuidadosamente diseñadas para evaluar y perfeccionar el componente WoT-IL con el propósito de asegurar que las funcionalidades básicas y avanzadas se ejecutaran conforme a los requisitos establecidos y a las expectativas de los usuarios finales. Las pruebas fueron incrementales y cada fase buscó abordar y resolver distintos desafíos técnicos y de usabilidad.

Durante la fase inicial de recogida de requisitos, se llevó a cabo un análisis detallado para identificar las necesidades y expectativas de los usuarios finales, así como las especificaciones técnicas necesarias para el desarrollo del sistema. Se definieron funcionalidades básicas cruciales que debía incluir el primer prototipo de WoT-IL. Estas funcionalidades se enfocaron en asegurar una conectividad robusta con diversos dispositivos industriales, la capacidad de integrar y procesar datos de múltiples fuentes y la interoperabilidad entre diferentes sistemas tecnológicos. Para profundizar en la comprensión de estas necesidades, se organizaron entrevistas y talleres con los trabajadores y otros interesados clave, con el objetivo de identificar cómo el sistema podría mejorar su experiencia laboral, optimizando procesos y facilitando la colaboración humano-máquina.

Durante las pruebas de laboratorio, el enfoque se centró en asegurar que las funcionalidades básicas de WoT-IL se ejecutaran conforme a los requisitos definidos en la fase de recogida de necesidades. Estas pruebas no solo verificaron que el componente cumplía con las expectativas técnicas establecidas, sino que también permitieron evaluar cómo WoT-IL podría adaptarse a diferentes entornos industriales. Las pruebas abarcaban aspectos clave como la conectividad, la interoperabilidad y la estabilidad del sistema, asegurando que cada

funcionalidad funcionara correctamente en condiciones reales y bajo diferentes cargas de trabajo. Este proceso fue fundamental para garantizar que WoT-IL pudiera integrarse sin problemas en entornos industriales heterogéneos, mejorando tanto la eficiencia operativa como la experiencia del usuario final.

Estas funcionalidades básicas incluyeron:

- **Conectividad de dispositivos:** Verificación de la capacidad de WoT-IL para conectar y comunicarse con diversos sensores y actuadores a través de un servidor OPC UA. Esta fase es fundamental para asegurar la versatilidad del componente desarrollado en entornos tan heterogéneos como las industrias, garantizando que WoT-IL pueda gestionar de manera eficaz la diversidad de dispositivos y sistemas presentes en un entorno industrial moderno.
- **Conversión de datos:** Asegurar la correcta traducción de datos desde el formato OPC UA a los modelos de datos de FIWARE y WoT. Esta fase es crucial para establecer la interoperabilidad semántica, objetivo central de este proyecto, ya que garantiza que los datos transferidos entre diferentes plataformas mantengan su integridad y significado. Esto fue validado en las siguientes fases de prueba, donde se comprobó la correcta traducción y manejo de datos entre sistemas heterogéneos.
- **Interoperabilidad básica:** Comprobación de que los datos convertidos podían ser intercambiados y utilizados por otros sistemas sin pérdida de información o precisión. Esta fase es fundamental para garantizar que WoT-IL facilite una comunicación fluida y precisa entre los diferentes sistemas industriales, eliminando las barreras de incompatibilidad tecnológica que a menudo se presentan en entornos industriales fragmentados. La interoperabilidad básica asegura que WoT-IL pueda ser integrado con otras plataformas y dispositivos sin requerir modificaciones significativas.
- **Estabilidad del sistema:** Evaluación de la estabilidad y la robustez de WoT-IL bajo diferentes condiciones de carga y estrés. Esta fase es fundamental para asegurar que WoT-IL pueda mantener su rendimiento y operatividad en situaciones de alta demanda, lo que es común en entornos industriales. Se realizaron pruebas de carga para simular picos en la demanda de datos, lo que permitió validar la capacidad de WoT-IL para funcionar de manera confiable y eficiente incluso en condiciones adversas.

Estas pruebas iniciales, que incluyeron pruebas funcionales para verificar la conectividad, la interoperabilidad y la conversión de datos, requisitos esenciales del componente, así como pruebas de estrés para evaluar la estabilidad del sistema bajo diferentes condiciones de carga, tal y como se ha introducido anteriormente, establecieron una base sólida para las siguientes etapas de integración en entornos reales. En estas etapas, el enfoque estuvo en la implementación y perfeccionamiento del componente en contextos industriales específicos, asegurando su operatividad, interoperabilidad y eficiencia en situaciones del mundo real.

Luego de realizar las pruebas de laboratorio descritas en la sección 3.4.1, que se llevaron a cabo en un entorno controlado y equipado con diversos sensores y actuadores conectados a través de un servidor OPC UA, se procedió a integrar el componente en entornos reales. El laboratorio, dotado con tecnología de última generación, incluía equipos como PLCs, sensores, actuadores eléctricos y sistemas de comunicación basados en OPC UA. Estas instalaciones permitieron recrear condiciones industriales y validar todas las funcionalidades del componente propuesto, asegurando que las interacciones entre los dispositivos se

realizaban de manera precisa y eficiente.

A continuación, se llevó a cabo la integración en entornos industriales auténticos (ver sección 3.4.1), como factorías y plantas de producción en colaboración con empresas del sector manufacturero y automotriz. Estos entornos reales, conocidos como *shopfloor* industrial, incluían líneas de producción automatizadas y una variedad de dispositivos IoT desplegados en un entorno de trabajo dinámico. El desafío en estos escenarios, una vez validadas todas las funcionalidades del componente, era la integración del mismo en entornos altamente complejos y variables. Así pues, el objetivo era asegurar que el componente WoT-IL funcionara de forma continua e indefinida en servidores industriales y en condiciones de operación reales.

En una segunda etapa, una vez constatada la integración satisfactoria del componente, se evaluó su desempeño en la traducción de mensajes, robustez, seguridad y su capacidad para operar en conjunto con otros componentes a través del *Orion-LD Context Broker* o el servidor WoT. Estos ensayos en entornos industriales reales demostraron la capacidad de WoT-IL para adaptarse y funcionar eficientemente en situaciones del mundo real, consolidando su viabilidad y efectividad. Las pruebas incluyeron la monitorización continua del rendimiento del sistema, pruebas de carga y estrés en condiciones de alta demanda, y evaluaciones de la seguridad de la transmisión de datos en redes industriales.

En el desarrollo de WoT-IL, se identificaron varios desafíos críticos que exigieron soluciones innovadoras para asegurar una integración efectiva del componente en sistemas industriales existentes. La metodología iterativa adoptada para la evaluación permitió el descubrimiento de estos desafíos, especialmente durante la primera fase de evaluación en el *shopfloor* industrial. En la identificación de los mismos, participaron trabajadores de todas las áreas a mejorar, desde trabajadores manuales a técnicos de integración, gestores y encargados de producción. La superación de estos obstáculos no solo abordó las necesidades inmediatas, sino que también fortaleció la funcionalidad y aplicabilidad de WoT-IL en diversos entornos. Entre los retos más destacados se incluyen los descritos en la Tabla 4.1.

A continuación, se destacan dos de estos desafíos:

- **Conexión a Servidores OPC UA:** Durante la fase inicial de integración en entornos reales, se enfrentó el reto de establecer una conexión efectiva con servidores OPC UA. Este problema surgió debido a la complejidad de las configuraciones de red y las diferencias en los protocolos de comunicación. Para superar este obstáculo, se utilizó el Cliente Node-OPCUA, una herramienta especializada que facilitó la conexión y comunicación con los servidores OPC UA, garantizando así una integración exitosa.
- **Despliegue del Orion-LD Context Broker:** Un desafío significativo fue implementar el Context Broker de FIWARE en redes industriales locales sin acceso a Internet. Este problema se descubrió durante la integración en plantas de producción que operan en entornos aislados. La solución implementada consistió en descargar los contextos semánticos de referencia en una máquina con acceso a Internet y luego desplegar todo el conjunto en la máquina de la red local de cada fábrica. Esta estrategia permitió que WoT-IL funcionara de manera eficiente y autónoma en estos entornos cerrados, asegurando la continuidad del servicio y la integridad de los datos.

**Tabla 4.1:** Desafíos Críticos y Soluciones en la Integración de WoT-IL

Desafío	Contexto de Descubrimiento	Motivo del Desafío	Solución Implementada
Conexión a Servidores OPC UA	Fase inicial de integración en entornos reales	Dificultad para establecer una conexión efectiva con servidores OPC UA	Uso del Cliente Node-OPCUA (Node-OPCUA, 2024)
Despliegue del Orion-LD Context Broker	Integración en redes industriales locales sin acceso a Internet	Implementar el Context Broker en redes locales sin acceso a Internet	Descarga de contextos semánticos en una máquina con acceso a Internet y despliegue local
Sincronización de datos en tiempo real	Pruebas en entornos de producción	Diferencias en tiempos de respuesta y latencia de red	Implementación de algoritmos de sincronización y buffer de datos
Seguridad en la transmisión de datos	Evaluación en redes industriales	Riesgos de ciberseguridad en la comunicación de datos sensibles	Implementación de cifrado de extremo a extremo y autenticación robusta
Gestión de grandes volúmenes de datos	Pruebas de carga y estrés	Sobrecarga en el procesamiento y almacenamiento de datos	Uso de tecnologías de almacenamiento distribuido y técnicas de compresión

Estos desafíos y sus soluciones reflejan la naturaleza iterativa y adaptable del proceso de desarrollo y evaluación de WoT-IL, resaltando la capacidad del componente para adaptarse y funcionar en diversos contextos industriales.

La retroalimentación recibida sobre el componente por parte de desarrolladores que necesitaban desplegar y utilizar los datos generados por WoT-IL fue un gran valor añadido. Siguiendo los principios de la Metodología UCD descrita en la sección 3.3.2, los desarrolladores y los operarios que trabajan en las industrias fueron incluidos como usuarios finales durante la evaluación. Esta inclusión permitió identificar nuevos requisitos y oportunidades de mejora para el componente. Las necesidades de los desarrolladores ayudaron a refinar la estructura y definir mejor las interacciones entre OPC UA, FIWARE y WoT, garantizando una mayor compatibilidad y utilidad del sistema.

Cada iteración del proceso abordó y resolvió problemas identificados previamente, mejorando de manera significativa la funcionalidad, seguridad y facilidad de uso de WoT-IL. Este proceso iterativo no solo mejoró la interoperabilidad entre sistemas, sino que también reforzó la posición de WoT-IL como un componente esencial en la infraestructura de transformación digital de las industrias participantes.

## 4.2 Requisitos del Componente WoT-IL

Los requisitos para el desarrollo de WoT-IL se derivaron de un análisis exhaustivo de las necesidades de interoperabilidad en entornos industriales, considerando tanto desafíos técnicos como operativos y de usabilidad. Este análisis incluyó la revisión de literatura, entrevistas con expertos en el dominio industrial, análisis de casos de uso específicos y la evaluación de tecnologías existentes (Carvajal-Flores et al., 2024).

Durante el proceso, se adoptó un enfoque iterativo para la definición de requisitos, lo que permitió refinar continuamente la tabla de requisitos (ver Tabla 4.2). Este enfoque incluyó ciclos de retroalimentación con *stakeholders* clave, en los que se validaron y ajustaron las capacidades críticas necesarias para mejorar la comunicación y el intercambio de datos entre dispositivos y sistemas heterogéneos. La iteración constante facilitó la identificación precisa de prioridades como la seguridad, escalabilidad y adaptabilidad a distintos entornos industriales, asegurando que WoT-IL respondiera efectivamente a las necesidades reales del sector.

**Tabla 4.2:** Requisitos Clave para el Desarrollo de WoT-IL

Requisito	Descripción
Interoperabilidad	Comunicación efectiva entre sistemas y dispositivos, utilizando estándares abiertos.
Escalabilidad	Capacidad de adaptarse a un crecimiento en el número de dispositivos y volumen de datos.
Seguridad y Privacidad	Protección robusta contra accesos no autorizados y garantía de privacidad de datos.
Flexibilidad	Facilidad de integración con diversas plataformas y adaptabilidad a cambios tecnológicos.
Eficiencia	Optimización del procesamiento de datos para minimizar la latencia y maximizar la respuesta rápida.

Estos requisitos son esenciales para el desarrollo de WoT-IL, destacando su rol fundamental en facilitar una transformación digital que es tanto técnica como centrada en el humano.

## 4.3 Diseño y Desarrollo de WoT-IL

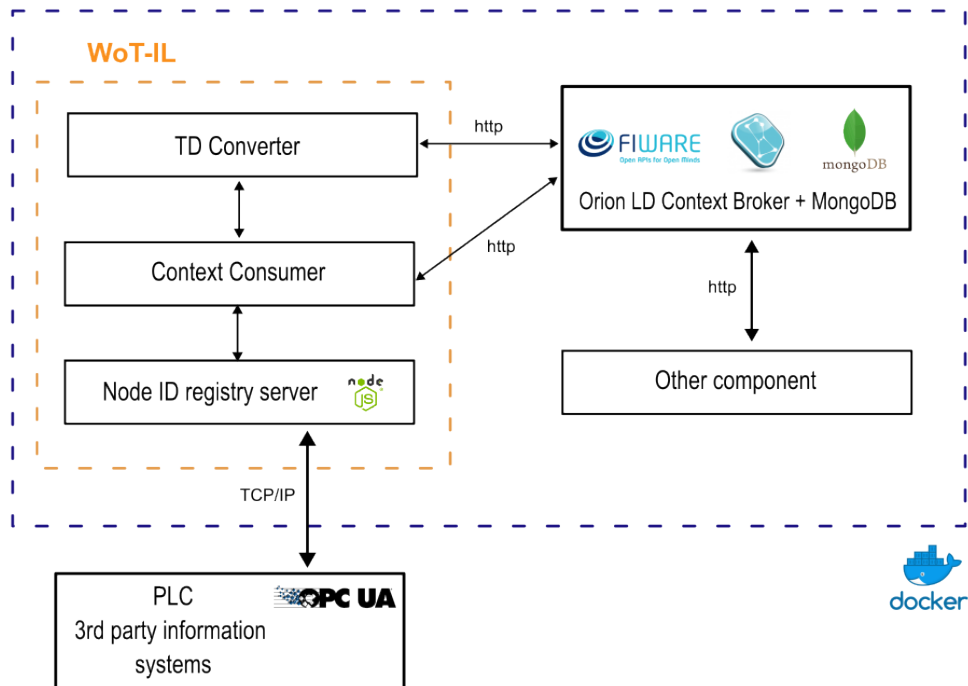
El propósito esencial de este desarrollo se centra en definir, implementar y evaluar una solución software que supera el desafío de establecer una estructura de datos común para la comunicación entre aplicaciones. Esto se logra mediante el uso de estándares industriales clave como OPC UA y dispositivos IoT, integrando arquitecturas de referencia consolidadas como WoT y FIWARE. Se ha creado WoT-IL, un componente innovador que posibilita que los datos generados por aplicaciones industriales basadas en OPC UA sean accesibles para dispositivos IoT, simplificando así la implementación de soluciones inteligentes y fomentando una interoperabilidad avanzada entre los componentes.

WoT-IL aprovecha las ventajas de combinar IoT con la automatización industrial, maximizando las capacidades de OPC UA, WoT y FIWARE. Nuestro fin es extender estos estándares a aplicaciones en sectores diversos, prestando especial atención a organizaciones con limitaciones de recursos y conocimientos técnicos, como el caso de las pymes.

OPC UA brinda un marco para la comunicación segura y eficiente, permitiendo el flujo de datos y control entre distintos dispositivos y sistemas mediante una arquitectura orientada a servicios. Por su parte, FIWARE y WoT ofrecen plataformas robustas para el desarrollo y despliegue de aplicaciones inteligentes, promoviendo la interacción fluida entre dispositivos, sistemas y aplicaciones a través de APIs estándar y un contexto compartido para los datos, mejorando la creación de soluciones interoperables.

En este marco, WoT-IL actúa como un puente, facilitando la traducción y el intercambio directo de datos entre los paradigmas de OPC UA y FIWARE, y permite la creación de gemelos digitales, con cada sensor o dispositivo identificado de forma única, permitiendo el acceso a su WoT *Thing Description* y fomentando un entorno de fábrica interconectado.

La implementación de WoT-IL se apoya en una infraestructura tripartita (ver Figura 4.2). La primera capa engloba la infraestructura física con sensores y actuadores comunicándose a través de un servidor OPC UA que interconecta todos los dispositivos. Las capas subsiguientes mapean los datos de OPC UA a los modelos de datos de FIWARE y WoT, respectivamente, lo que facilita una interoperabilidad semántica avanzada. Esta arquitectura se implementa tanto en el área de producción como en los servidores mediante infraestructura contenerizada utilizando Docker. La elección de una infraestructura contenerizada y Docker se debe a sus beneficios en términos de portabilidad, escalabilidad y aislamiento de aplicaciones, lo que garantiza un despliegue más eficiente y manejable de los componentes del sistema. Esto subraya la importancia de OPC UA, WoT y FIWARE en el desarrollo del componente, permitiendo una integración y operatividad eficientes en entornos industriales reales.



**Figura 4.2:** Arquitectura del componente WoT-IL

Al adentrarnos en la funcionalidad detallada del componente WoT-IL, el servidor de registro NodeID juega un papel crucial. Este módulo está diseñado para capturar entradas de servidores de terceros, específicamente PLCs, siguiendo el modelo de datos de OPC UA y exponiendo datos de sensores y actuadores dentro de sus respectivas redes. Los nodos OPC UA, que son el elemento básico de comunicación de este protocolo, pueden ser dispositivos, variables de proceso, estructuras de control, aplicaciones, etc., y se utilizan para la comunicación entre diferentes sistemas de automatización y el intercambio de datos en tiempo real. Cada nodo OPC UA tiene un identificador único y un conjunto de atributos y propiedades que describen su estado y comportamiento. La función principal del servidor de registro NodeID es preservar el valor semántico presente en las diferentes definiciones de esta especificación, configurar los nodos de los servidores de terceros y añadirlos a las variables de entrada del WoT-IL, conservando los valores semánticos originales del PLC. Una vez configurados los nodos en el servidor o verificada su existencia, deben añadirse a las variables de entorno del componente desplegado en Docker. Para configurar el módulo cliente OPC UA dentro del componente WoT-IL, las variables de entorno `OPC_UA_SERVER` y `NODE_ID1` deben ser definidas de la siguiente manera:

```
OPC_UA_SERVER = opc.tcp://[Server IP]:[OPC UA Port]
```

Para conectarse al servidor OPC UA, y:

```
NODE_ID1 = ns=[NamespaceIndex];[IdentifierType]=[NodeIdIdentifier]
```

para especificar el nodo. Esta configuración garantiza la identificación y el acceso sin fisuras a la información que contiene cada nodo, lo que agiliza el proceso de integración en el componente WoT-IL.

Después de haber configurado todos los nodos, el módulo Consumidor de Contexto está listo para leer la información que contienen y proceder al siguiente paso, que es la definición de las entidades FIWARE. Los metadatos de un nodo OPC UA se definen en la información de descripción del nodo, que incluye propiedades como el identificador del nodo, el tipo de datos, la descripción y otros atributos relevantes. Estos metadatos se utilizan para describir y gestionar la información asociada a un nodo y permiten a los clientes y servidores OPC UA intercambiar datos de forma eficiente y fiable. Este módulo enriquece esta definición con contextos semánticos FIWARE, transformando la información del nodo en una entidad FIWARE que puede ser reconocida por el FIWARE CB.

El proceso de mapeo se inicia con la identificación de las propiedades esenciales de cada nodo OPC UA mediante el cliente node OPC UA, que lee y captura la información necesaria. A continuación, estas propiedades, detalladas como la variable `node class`, son mapeadas a las propiedades correspondientes en la `device entity` de FIWARE. Por ejemplo, el `node ID` se traduce directamente a la `ID` de la `device entity`. El `display name` se convierte en la propiedad `name`, y la descripción se transfiere sin cambios. Además, los valores de las propiedades como `value`, `datatype`, y `value rank` de la `node class` se consolidan en la propiedad `value` de la `device entity`. Esta metodología asegura que cada `device entity` refleje fielmente las características y el estado del nodo OPC UA correspondiente.

Finalmente, las Entidades FIWARE resultantes se publican en un Orion-LD Context Broker (CB) desplegado en la red local, como se resume en la Figura 4.3, asegurando así la integración efectiva y la disponibilidad de datos en tiempo real dentro del ecosistema FIWARE.

Un proceso similar es realizado por el módulo TD Converter que traduce los metadatos y propiedades del nodo OPC UA a un formato compatible con el estándar WoT. Esto incluye la traducción de identificadores de nodo, tipos de datos, descripciones y otros atributos relevantes. Al final de esta conversión, se obtienen los archivos JSON, que completan el proceso de conversión. El archivo JSON del "TD" se guarda para su uso en entornos abiertos. La Figura (4.4) presenta el proceso de mapeo realizado en este módulo.

El proceso de mapeo realizado por el módulo TD Converter es similar al mapeo descrito anteriormente para FIWARE, pero esta vez orientado a generar una WoT - *Thing Description* compatible con el estándar . En este caso, las propiedades del nodo OPC UA se mapean directamente a las propiedades correspondientes en la *Thing Description*. Por ejemplo, el `node ID` se traduce en la propiedad `ID` de la *Thing Description*, mientras que el `display name` del nodo OPC UA se convierte en el `title` de la *Thing Description*. De manera similar, la propiedad `description` del nodo se mapea directamente a la propiedad `description` de la *Thing Description*. Además, las propiedades `value`, `datatype` y `value rank` del nodo OPC UA se agrupan en la propiedad `properties` dentro de la *Thing Description*. Este proceso garantiza que los datos del nodo OPC UA se puedan utilizar de manera eficiente y compatible en entornos que sigan los principios de la Web of Things, permitiendo su integración con dispositivos y aplicaciones IoT a través de descripciones semánticamente enriquecidas.

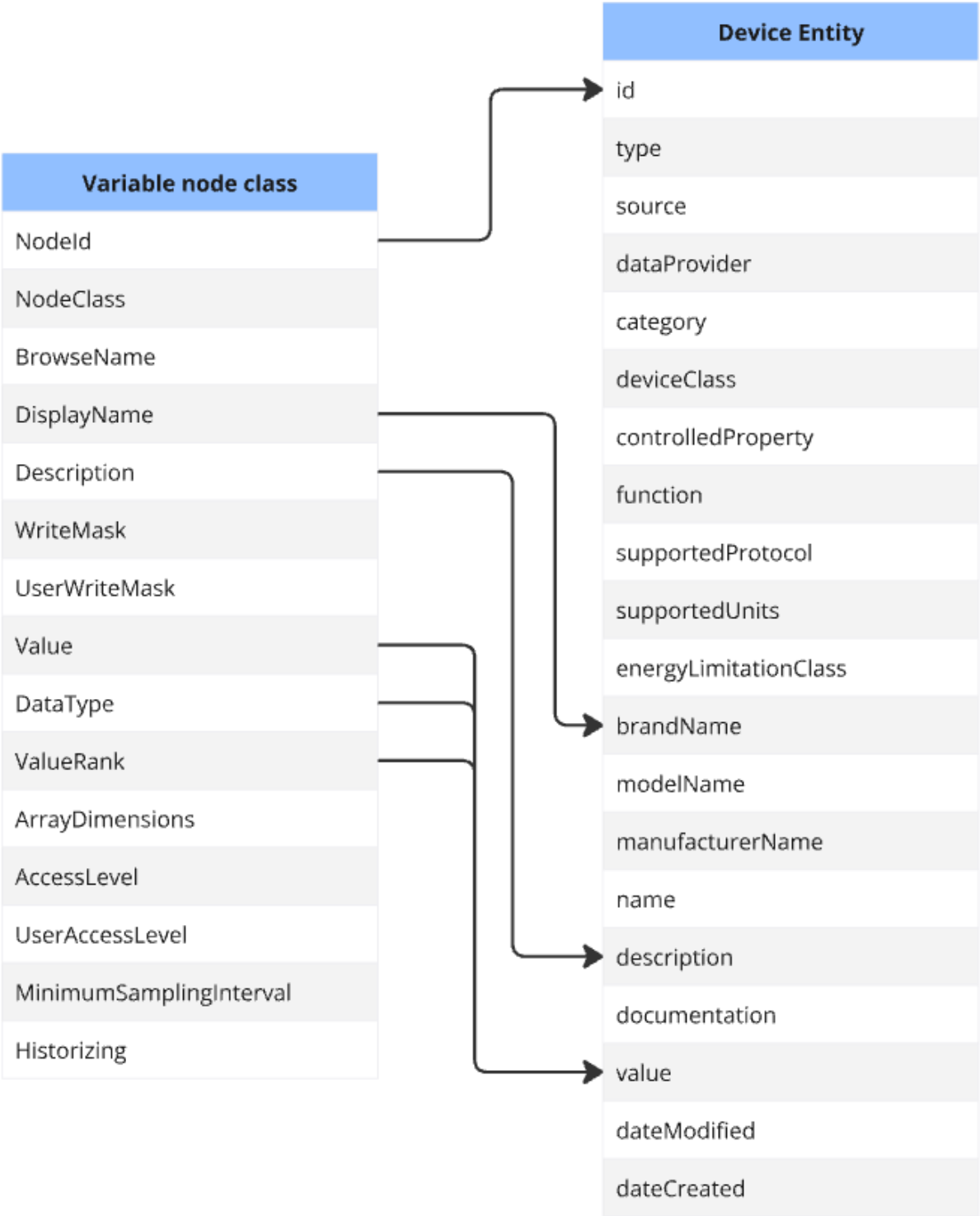
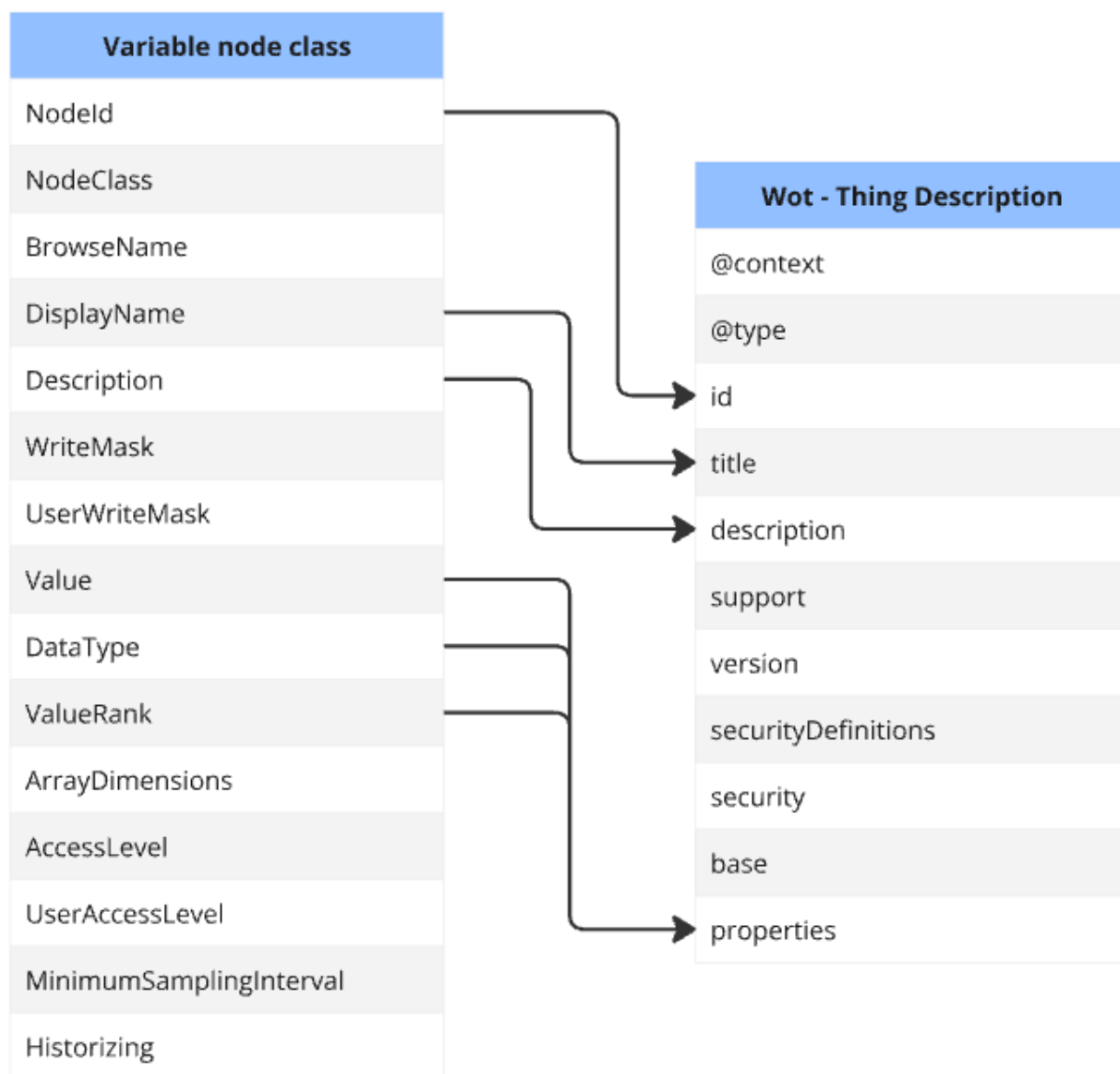


Figura 4.3: Relación entre un Nodo OPC UA y una Entidad FIWARE



**Figura 4.4:** Relación entre un Nodo OPC UA y una WoT “Thing Description”

El diseño sigue una arquitectura modular, en la que cada módulo tiene un papel bien definido en el proceso de captura, traducción y exposición de los datos en un formato normalizado. De este modo se abordan distintos tipos de interoperabilidad:

1. **Interoperabilidad sintáctica:** Se consigue mediante la relación y conversión de OPC UA a los modelos de datos WoT y FIWARE. Esto implica la traducción de los datos desde el formato nativo de OPC UA a formatos compatibles con WoT y FIWARE, permitiendo así que los sistemas heterogéneos puedan entender y procesar los datos intercambiados sin ambigüedades. Esta conversión es crucial para asegurar que los datos estructurados de diferentes dispositivos puedan ser integrados y utilizados en una plataforma común.
2. **Interoperabilidad semántica:** Conseguida mediante el uso de Entidades FIWARE definidas siguiendo la especificación NGSI-LD y WoT TD definidas siguiendo el método de codificación de datos JSON-LD. La estructura de metadatos proporcionada por estas especificaciones permite un intercambio directo de mensajes basado en una

interfaz unificada basada en HTTP. La interoperabilidad semántica es alcanzada porque estas entidades y definiciones aseguran que los datos no solo sean intercambiables, sino también comprensibles en su contexto, facilitando una comprensión común y precisa de la información compartida entre diferentes sistemas y aplicaciones.

Aunque el sistema WoT-IL pueda parecer orientado a procesos, es fundamental destacar el uso de un modelo de objetos. Un modelo de objetos se diferencia de un modelo de procesos en que se centra en la representación de entidades y sus relaciones, en lugar de en los pasos o secuencias de acciones. El uso de un modelo de objetos en el sistema WoT-IL es clave para garantizar una integración flexible y eficiente en entornos industriales y de IoT. A diferencia de un modelo de procesos, que se enfoca en secuencias de acciones, un modelo de objetos en WoT-IL captura las entidades (como sensores, actuadores y otros dispositivos) y sus relaciones jerárquicas, mejorando la interoperabilidad entre sistemas. Esta estructura, que se aplica sobre la capa OPC UA, permite que las entidades sean traducidas y gestionadas de manera consistente en el ecosistema FIWARE, facilitando el flujo de datos y permitiendo una mayor eficiencia en la toma de decisiones. Este enfoque permite una estructura más flexible y robusta para la gestión de datos, ya que las entidades pueden ser fácilmente mapeadas y traducidas al modelo de datos FIWARE.

El modelo de objetos facilita una integración más fluida y una interoperabilidad avanzada, ya que permite que las diversas entidades y sus atributos sean entendidos y utilizados de manera coherente por diferentes sistemas y plataformas. Esto no solo mejora la capacidad de WoT-IL para manejar datos de manera eficiente, sino que también asegura que los sistemas puedan comunicarse y trabajar juntos sin problemas, independientemente de sus orígenes o especificaciones. En resumen, la implementación de un modelo de objetos dentro de WoT-IL mejora nuestra visión de un sistema integrado y adaptable, capaz de soportar una amplia gama de aplicaciones industriales y de IoT, promoviendo así una transformación digital más accesible y efectiva.

# Capítulo 5

## Validación y Resultados

Este capítulo aborda la validación y los resultados de WoT-IL, centrándose en la evaluación del componente en términos de interoperabilidad, eficiencia operativa y mejora de la colaboración entre humanos y máquinas en entornos industriales. A pesar de que las metodologías de validación se discutieron previamente, este capítulo profundiza en el análisis de los datos obtenidos durante las pruebas de campo y presenta una evaluación detallada del impacto y las mejoras que WoT-IL aporta a los sistemas de transformación digital.

### 5.1 Validación Técnica

La validación técnica del componente WoT-IL es esencial para garantizar su robustez y eficacia en entornos industriales reales. Esta sección describe los métodos y herramientas utilizados para evaluar el rendimiento y la resiliencia del sistema bajo condiciones de operación típicas y extremas. Se han implementado dos enfoques principales para esta validación: la observabilidad del rendimiento y la generación de carga variable y masiva. Estos enfoques aseguran que el componente pueda manejar de manera efectiva la carga de trabajo y los datos generados por los PLCs en un entorno de taller real, garantizando así la confiabilidad y eficiencia del sistema en aplicaciones industriales prácticas.

Para el banco de pruebas se tuvieron en cuenta los siguientes objetivos de diseño:

1. **Observabilidad del rendimiento:** Es decir, la capacidad de capturar, analizar y presentar con precisión información sobre el rendimiento del componente propuesto. En un taller real, los PLC interactúan con los componentes desplegados y es necesario equilibrar la necesidad de datos de rendimiento con el coste de obtenerlos. Dado que la productividad y la eficiencia son KPIs fundamentales en los procesos industriales (K. Bauer, 2004), hemos utilizado el sistema de monitorización Prometheus (Prometheus.io, 2024) y cAdvisor (Google, 2024) para recopilar métricas de rendimiento exhaustivas. La observabilidad es clave para monitorear el comportamiento del sistema en tiempo real, utilizando tres pilares fundamentales: logs, métricas y trazas distribuidas, lo que permite identificar problemas antes de que afecten el rendimiento. No solo se centra en recopilar datos, sino en analizar cómo las aplicaciones responden en escenarios reales, asegurando que el sistema maneje el flujo de trabajo sin interrupciones. Esto es particularmente importante en un entorno

industrial con PLCs, donde cualquier interrupción puede ser costosa y peligrosa para la producción. Herramientas como las mencionadas anteriormente integran estas capacidades para mejorar el monitoreo del rendimiento de aplicaciones y sistemas en tiempo real, proporcionando visibilidad tanto en preproducción como en producción real.

2. **Generación de carga variable y masiva:** Para generar la situación de heterogeneidad y sobrecarga que podría darse en un escenario real de taller con múltiples PLCs trabajando en múltiples estaciones de trabajo. Se utilizó Apache JMeter (Apache Software Foundation, 2024) para generar grandes tasas de nuevos nodos activos. Estas herramientas permiten automatizar la creación de pruebas realistas que simulan tráfico real de producción, probando el comportamiento del sistema en escenarios exigentes, como grandes volúmenes de datos y solicitudes simultáneas. Esto es fundamental en un entorno con PLCs, donde los datos en tiempo real deben ser procesados de manera eficiente.

### 5.1.1 Diseño y configuración del entorno de pruebas

En el diseño del banco de pruebas experimental, se ha empleado Docker para crear entornos aislados, garantizando unas condiciones de prueba idóneas. El uso de Docker en este contexto asegura que cada componente del sistema WoT-IL esté aislado y controlado, replicando entornos reales de operación sin interferencias externas. Esta tecnología permite que cada contenedor simule un dispositivo o componente del sistema IoT, lo cual es crucial para evaluar el rendimiento y la interoperabilidad en una configuración dinámica y compleja como la de la Industria 5.0. Las herramientas de supervisión cAdvisor y Prometheus se configuraron para la recopilación de métricas en tiempo real, con el seguimiento del uso de recursos, la latencia y el rendimiento. Mientras que cAdvisor proporciona una visión en tiempo real del software probado, incluyendo el consumo de recursos (CPU, memoria, red, almacenamiento) de cada contenedor Docker, también brinda información inmediata sobre el comportamiento de las aplicaciones. Esto permite observar cómo las soluciones WoT responden a diferentes niveles de demanda de recursos y cargas de trabajo.

Por otro lado, Prometheus ofrece una solución de monitoreo más avanzada que permite almacenar las métricas recolectadas por cAdvisor y otros sistemas a lo largo del tiempo. Esto posibilita realizar análisis históricos para identificar patrones de consumo de recursos o cuellos de botella que pueden afectar la escalabilidad y eficiencia del sistema. Las métricas recolectadas son clave para la toma de decisiones en cuanto a optimización y escalabilidad, ya que permiten identificar cuándo y cómo ajustar los recursos o el diseño del sistema para soportar mayores cargas. Grafana proporcionó la plataforma de visualización para los datos recogidos por cAdvisor y Prometheus. Grafana transforma las métricas en dashboards interactivos, facilitando la interpretación de los datos y la comparación del rendimiento del sistema WoT-IL en diferentes escenarios simulados de IoT. Al observar cómo los contenedores responden a diferentes volúmenes de datos y solicitudes simultáneas, los investigadores pueden evaluar la escalabilidad, eficiencia e interoperabilidad de las soluciones implementadas, elementos esenciales para las aplicaciones industriales de la próxima generación.

Se han utilizado dos Máquinas Virtuales (VMs, del inglés *Virtual Machine*) para realizar los experimentos. Se han usado las versiones de las aplicaciones que provienen de las recomendaciones de la documentación de WoT y FIWARE. En VM #1, desplegamos los

módulos que permiten el análisis de rendimiento y los servidores OPC UA simulados, y en VM #2, desplegamos las aplicaciones bajo prueba: la solución de interoperabilidad WoT-IL, FIWARE Orion-LD CB, y MongoDB. Configuramos ambas VMs con la configuración estándar de instancia t2.medium de Amazon AWS (2 vCPU - 4 GB de RAM).

Para el propósito del presente trabajo, el cliente Node-OPCUA sirve como implementación de un cliente OPC UA dentro del entorno de ejecución Node.js. Aprovechando la potencia del ecosistema Node.js, el cliente Node-OPCUA utiliza los lenguajes de programación JavaScript o TypeScript, aprovechando su naturaleza asíncrona y basada en eventos. Esto permite una comunicación en tiempo real con servidores OPC UA, lo que es crucial para la captura de datos, la supervisión y el control en sistemas industriales. Este cliente permite el acceso en tiempo real a los datos, la suscripción a eventos y la ejecución de operaciones en servidores OPC UA. Al aprovechar el amplio ecosistema de bibliotecas y la arquitectura modular de Node.js, el cliente permite a los desarrolladores crear aplicaciones industriales sólidas, como sistemas de supervisión y control en tiempo real, soluciones de gestión de activos y sistemas de adquisición de datos. En entornos industriales, el cliente Node-OPCUA proporciona un medio fiable y eficiente para establecer conexiones y facilitar una comunicación fluida con servidores OPC UA, garantizando una integración e interoperabilidad optimizadas. Estos experimentos permiten evaluar si las soluciones WoT pueden integrarse eficazmente en un ecosistema Industria 5.0, donde la interacción entre humanos y máquinas, así como la interoperabilidad semántica, son esenciales. A través de este tipo de pruebas se puede asegurar que los sistemas sean capaces de adaptarse a un entorno cambiante y a las demandas crecientes de la digitalización industrial.

Asimismo, se han desplegado el Orion-LD CB y el servidor WoT para facilitar la gestión automática de los mensajes generados por WoT, simulando diferentes acciones en una fábrica; es decir, para automatizar la gestión de un robot utilizando habilitadores de control de automatización. El Orion-LD CB, parte del ecosistema FIWARE, actúa como un gestor central de datos contextuales, lo que permite administrar la información que fluye entre los dispositivos conectados y las aplicaciones. Orion-LD CB facilita la interoperabilidad semántica al proporcionar una plataforma para la gestión de mensajes, actualizaciones contextuales y el seguimiento de eventos en tiempo real. Por otro lado, el servidor WoT simula diferentes acciones dentro de una fábrica, como la automatización de robots, utilizando habilitadores de control. Estos habilitadores permiten a los robots industriales recibir comandos automáticos en función de eventos contextuales, lo que optimiza la toma de decisiones en tiempo real y reduce la intervención manual. Esto es particularmente útil en fábricas inteligentes, donde la integración de múltiples dispositivos y la automatización avanzada son esenciales para aumentar la eficiencia y la precisión en la producción.

### 5.1.2 Generación de carga de protocolos IoT

En nuestra batería de pruebas, simulamos tres servidores OPC UA diferentes que envían mensajes capturados de una variedad de sensores conectados a ellos. El número de sensores y la periodicidad de los mensajes de los sensores varían durante el experimento de forma aleatoria. Estos mensajes sintéticos se identifican mediante un `NodeId` generado como un número identificador secuencial, un tipo de mensaje que identifica el tipo de información del sensor (temperatura, presión, estado, nivel, etc.), el tipo de dato de esa información y el valor. La Tabla 5.1 muestra varios ejemplos de nodos OPC UA, cada uno con características y atributos diferentes en el contexto de la automatización industrial y el intercambio de

datos.

**Tabla 5.1:** Ejemplos de Nodos OPC UA

Servidor	Node ID	Nombre para mostrar	Tipo de datos	Valor
A	ns=2;i=1001	Temperatura	Float	25.6
A	ns=2;i=1002	Presión	Float	101.2
B	ns=3;i=2001	Estado	Boolean	True
B	ns=3;i=2002	Nivel	Int32	75
C	ns=4;i=3001	Velocidad	UInt16	500

La Tabla 5.1 incluye campos esenciales como *Servidor*, *Node ID*, *Nombre para mostrar*, *Tipo de datos* y *Valor*, que en conjunto proporcionan una descripción detallada de la infraestructura OPC UA que se utilizará para la configuración del componente WoT-IL durante la realización del experimento. Bajo el encabezado *Servidor* se identifican varios servidores, indicados mediante etiquetas alfabéticas, que significan la fuente u origen de los respectivos nodos. Por otro lado, la columna *Node ID* incorpora identificadores únicos globales que garantizan una identificación inequívoca y la diferenciación entre los distintos nodos. Estos identificadores, representados en el formato `ns=i`, sirven como referencias indispensables para localizar y acceder a nodos específicos dentro del servidor OPC UA.

La columna *Nombre para mostrar* contiene descripciones legibles asignadas a cada nodo, que permiten un reconocimiento intuitivo y la comprensión de sus funcionalidades. La delimitación del tipo de datos asociado a cada nodo se define en la columna *Tipo de datos*, que abarca una serie de tipos primitivos y complejos como `Float`, `Boolean`, `Int32` y `UInt16`. Por último, la columna *Valor* recoge el valor o estado actual de cada nodo, que representa la información en tiempo real que se supervisa o controla.

La definición de la *Device Entity*, basada en los valores extraídos de la primera fila de la Tabla 5.1, ha sido llevada a cabo por el componente WoT-IL, siguiendo el modelo de datos FIWARE. La entidad resultante, identificada como `urn:ngsi-ld:Device:Test1`, en la Figura 5.1, sirve como representación de una perspectiva centrada en el dispositivo dentro del dominio de la automatización industrial. En este ejemplo, la *Device Entity* corresponde a un sensor de temperatura en una línea de producción, con un valor de temperatura actual de 25.6°C y un estado de funcionamiento ".°K". Este sensor está vinculado a un servidor OPC UA, identificado mediante su *Node ID*, y puede ser monitorizado en tiempo real. La *Device Entity* incluye atributos como el tipo de datos (`Float`) y el *Display Name* asociado, que permite una fácil identificación del sensor en la red industrial. Además, la entidad está configurada para generar alertas en caso de que la temperatura exceda ciertos umbrales, lo que asegura una rápida intervención en situaciones críticas.

```

{
  "id": "ns=2;i=1001",
  "type": "Device",
  "category": {
    "type": "Property",
    "value": ["sensor"]
  },
  "controlledProperty": {
    "type": "Property",
    "value": ["Temperature"]
  },
  "value": {
    "type": "Property",
    "value": 25.6,
    "observedAt": "2022-12-01T11:23:19Z"
  },
  "deviceState": {
    "type": "Property",
    "value": "ok"
  },
  "@context": [
    "https://smartdatamodels.org/context.jsonld"
  ]
}

```

**Figura 5.1:** Ejemplo de una Device Entity de FIWARE

El contexto semántico se integra a través del campo “@context”, que hace referencia a los vocabularios semánticos usados en la definición de la Entidad FIWARE. Dentro de esta, el dispositivo se categoriza como “sensor”, y su propiedad controlada se define como “Temperatura”. El valor de temperatura observado de 25,6, acompañado de la marca de tiempo “2022-12-01T11:23:19Z” en la propiedad “value”, indica datos en tiempo real. La propiedad “deviceState” denota el estado operativo del dispositivo, especificado como “ok”. Esta integración del contexto semántico mejora la interoperabilidad y permite tomar decisiones en función del contexto, lo que permite a las partes interesadas obtener información significativa y liberar todo el potencial del dispositivo en un entorno inteligente e interconectado.

Por otro lado, la *WoT-Thing Description* (WoT-TD) presentada en la Figura 5.2 ejemplifica el resultado de aprovechar el componente WoT-IL para promover la interoperabilidad e infundir contexto semántico a partir de los valores definidos en OPC UA. Utilizando WoT-IL, la TD encapsula información crucial sobre el sensor de temperatura del motor de

una máquina, facilitando una integración perfecta dentro de un entorno Web of Things. La TD describe propiedades esenciales, como “*sensorStatus*” y “*readSensorValue*”, que proporcionan acceso a los datos relevantes del sensor. Para exponer la *Thing Description* y permitir la interacción con los valores del sensor, se hace imprescindible el despliegue de servicios adecuados, como una API. Al adherirse a los principios de WoT y aprovechar el componente WoT-IL, esta WoT-TD establece una representación estandarizada, permitiendo una mayor interoperabilidad y facilitando la integración de diversos sistemas, mientras que los servicios asociados proporcionan los medios para acceder a los valores del sensor con fines de supervisión y control.

La Figura 5.2 muestra una definición de una *Thing Description* de WoT, que también corresponde a un sensor de temperatura. Esta *Thing Description* incluye un campo de contexto, que agrega un valor añadido semántico. A diferencia de otras representaciones, en este caso, no se especifica directamente el valor de la medición de temperatura dentro de la *Thing Description* misma, ya que esta información está disponible a través del servidor *Web of Things*. Esta *Thing Description* describe el sensor y lo hace accesible en tiempo real, lo que permite consultar sus datos de manera inmediata cuando sea necesario. Todas las propiedades del sensor están descritas de acuerdo con el estándar WoT, garantizando su interoperabilidad y accesibilidad dentro del ecosistema. Este enfoque asegura que los datos del sensor sean accesibles y gestionados de manera eficiente en aplicaciones IoT, mejorando la supervisión y el control en tiempo real.

```
{
  "@context": "https://www.w3.org/2019/wot/td/v1",
  "@type": "Thing",
  "id": "ns=2;i=1001",
  "title": "Temperature",
  "description": "Example of TD interacting with an engine temperature sensor.",
  "support": "mailto:apitteam@example.io",
  "version": "1.0.0",
  "securityDefinitions": {
    "oauth2_sc": {
      "scheme": "oauth2",
      "authorizationUrl": "https://example.io/oauth/authorize",
      "flow": "implicit",
      "scopes": {
        "read:sensor": "read your sensor"
      }
    }
  },
  "security": ["oauth2_sc"],
  "base": "https://example.io/v2",
  "properties": {
    "sensorStatus": {
      "type": "string",
      "readOnly": false,
      "writeOnly": false,
      "forms": [
        {
          "op": ["readproperty"],
          "href": "https://example.io/v2/pet/sensorStatus",
          "contentType": "application/json"
        }
      ]
    },
    "readSensorValue": {
      "type": "float",
      "readOnly": false,
      "writeOnly": false,
      "forms": [
        {
          "op": ["readproperty"],
          "href": "https://example.io/v2/pet/readSensorValue",
          "contentType": "application/json"
        }
      ]
    }
  }
}
```

Figura 5.2: Ejemplo de una Thing Description

### 5.1.3 Plan de Pruebas Técnicas

Para evaluar el rendimiento del componente WoT-IL con las tasas de actualización del servidor OPC UA, se ha tenido en cuenta el rendimiento de las bases de datos MongoDB (una vinculada al Orion-LD Context Broker y otra al servidor WoT), el uso de recursos (CPU, memoria activa y datos transmitidos) y la latencia de consulta de entidad en ambos componentes. La evaluación del rendimiento del componente WoT-IL, especialmente en relación con las tasas de actualización del servidor OPC UA, requiere analizar varios factores clave, como el uso de recursos, la latencia y la escalabilidad del sistema. JMeter simula los cambios de estado de los sensores conectados a los PLC, creando una captación asíncrona a lo largo de 180 segundos para garantizar mediciones de estado estacionario a través de Grafana y Prometheus, permitiendo la evaluación de la escalabilidad del sistema. Durante las pruebas, que incluyeron 600 escenarios de simulación, se midieron los efectos de la escalabilidad en las instancias de PLC y en los mensajes almacenados en MongoDB. Las métricas obtenidas a través de Prometheus revelaron cuellos de botella potenciales, como la latencia de consulta de entidades y el uso intensivo de CPU y memoria, lo que permitió identificar áreas para optimizar la eficiencia y reducir los costos de implementación en entornos industriales complejos. Finalmente, se obtuvo una entidad FIWARE publicada en el *Context Broker* y una actualización de las WoT TDs en las que los valores de las propiedades hubiesen sufrido cambios.

### 5.1.4 Análisis Comparativo de Rendimiento en el Entorno FIWARE Durante las Pruebas de Laboratorio

En esta sección, se lleva a cabo un análisis detallado del rendimiento del componente WoT-IL en comparación con el agente F4I OPC UA (Engineering Research and Development, 2024). El agente F4I OPC UA es una herramienta clave que permite la conexión del servidor OPC UA al Context Broker Orion-LD de FIWARE, facilitando la publicación de actualizaciones en las entidades configuradas en FIWARE. Este agente actúa como un puente que traduce las comunicaciones desde el estándar industrial OPC UA al modelo de datos de FIWARE, permitiendo una integración fluida de datos en sistemas heterogéneos.

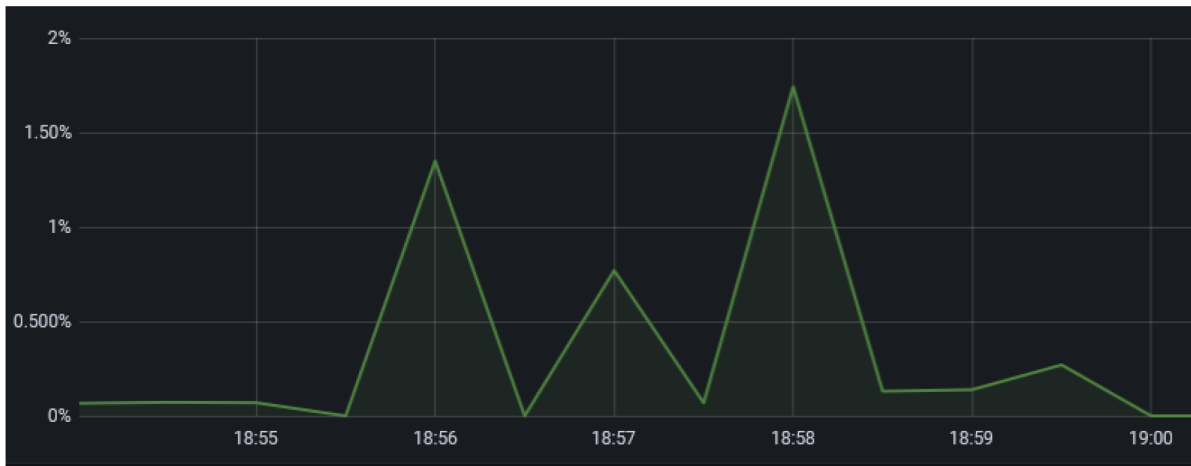
Para evaluar la precisión y eficiencia de estas traducciones, se realizaron comparaciones detalladas entre los mensajes generados por el servidor OPC UA y los datos recibidos en el Orion-LD CB, almacenados en MongoDB. La validación de la integridad de los mensajes fue ejecutada manualmente, asegurando que el número y contenido de las entidades en los mensajes de entrada y salida coincidieran perfectamente. Los resultados mostraron una alta fidelidad en la traducción, con una precisión cercana al 100 %.

Además, se utilizaron herramientas de monitoreo como Prometheus y Grafana para analizar el rendimiento de WoT-IL frente al agente F4I OPC UA en términos de uso de recursos y velocidad de procesamiento. WoT-IL demostró un rendimiento superior, utilizando un máximo de solo el 1,75 % de la CPU, con un promedio de alrededor del 0,5 %, mientras que el agente F4I OPC UA registró un promedio del 2,5 % de uso de CPU. Estas métricas subrayan la eficiencia de WoT-IL en la gestión de recursos y su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos de manera efectiva (ver Figuras 5.3 y 5.4).

El uso de memoria es mayor en el agente F4I OPC UA debido a que el CB actualiza el atributo almacenado en MongoDB cada vez que se actualiza un valor en el NodoID de OPC UA, aumentando la demanda de procesamiento de la base de datos. El consumo

medio de memoria para WoT-IL fue de 75,3 MiB, significativamente inferior a los 218 MiB del agente F4I OPC UA (Figuras 5.5 y 5.6). El uso de CPU en el agente F4I OPC UA crece rápidamente. Mientras que el uso de CPU en el componente WoT-IL parece crecer linealmente con la carga en MongoDB, en el agente F4I OPC UA este crecimiento es más exponencial que lineal y se mantiene en el tiempo.

En las pruebas realizadas, se observó que WoT-IL manejó las velocidades de transmisión de datos de manera eficiente. Aunque el agente F4I OPC UA registró velocidades más altas, alcanzando hasta 600 B/s (ver Figura 5.8), este comportamiento no necesariamente indica una mayor eficiencia. De hecho, WoT-IL alcanzó un pico máximo de 250 B/s (ver Figura 5.7) y mantuvo una velocidad promedio por debajo de 50 B/s, demostrando su capacidad para gestionar la transmisión de datos de manera más controlada y estable. Esta diferencia en las velocidades refleja una optimización en el uso del ancho de banda y una reducción en la sobrecarga de la red, aspectos clave para entornos industriales donde la eficiencia en el manejo de la comunicación de datos es crítica. Por lo tanto, a pesar de las aparentes velocidades más bajas, WoT-IL se destaca por su enfoque más eficiente y adaptado a las necesidades reales del sistema, proporcionando un rendimiento óptimo sin sacrificar la calidad de la transmisión. Estos resultados, respaldados por los gráficos que se encuentran a continuación, dan relevancia a la eficiencia de WoT-IL y su potencial para ofrecer soluciones rentables para la interoperabilidad de la Industria 5.0.



**Figura 5.3:** WoT-IL: Uso de la CPU (%)

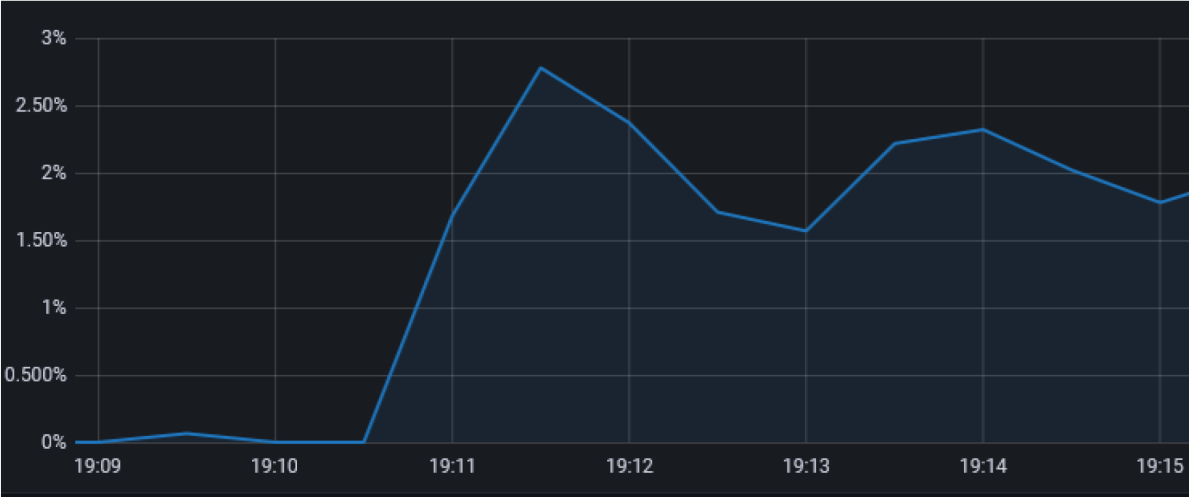


Figura 5.4: F4I OPC UA: Uso de la CPU (%)

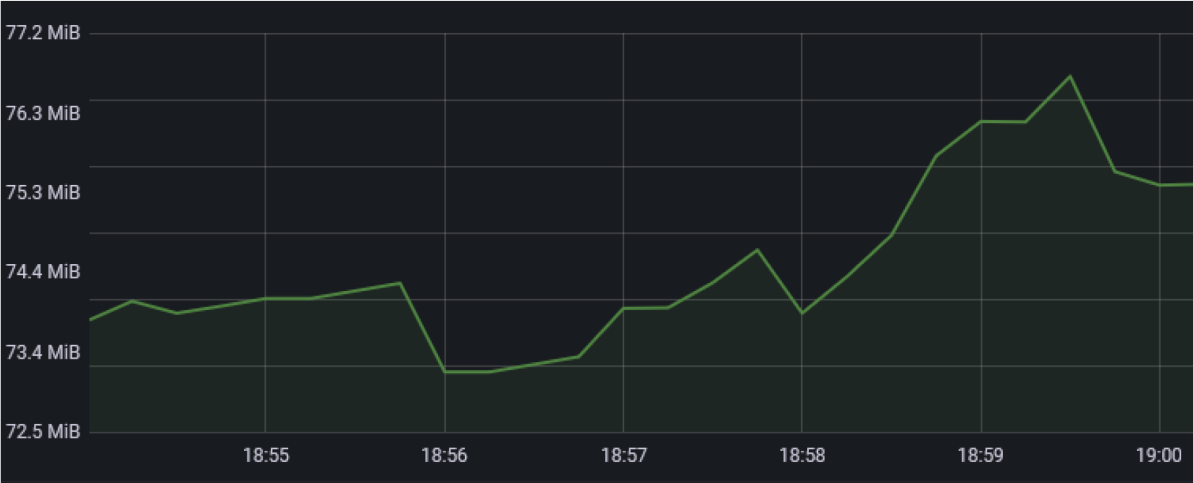


Figura 5.5: WoT-IL: Uso de Memoria (%)

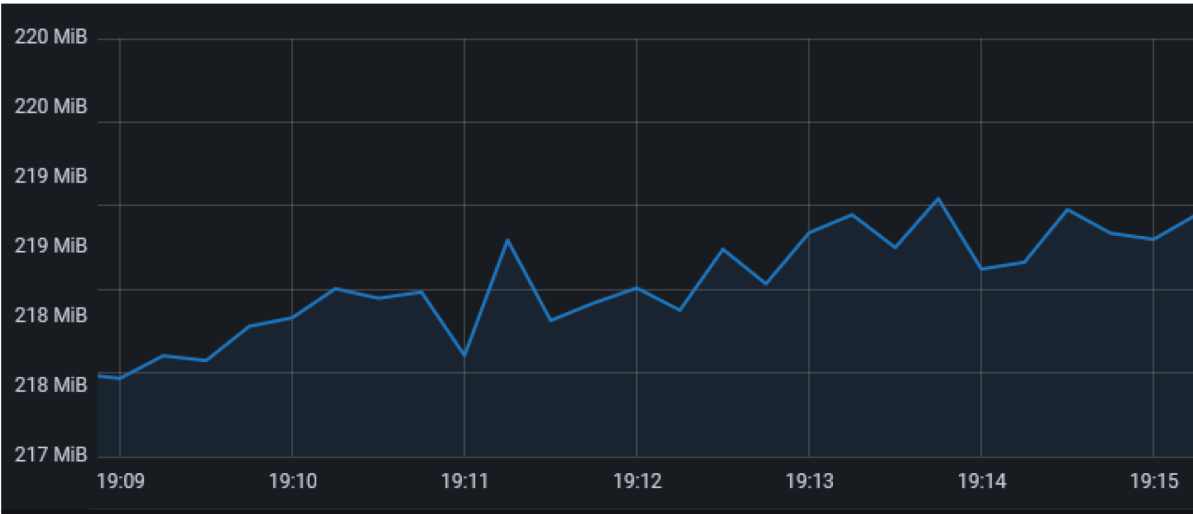
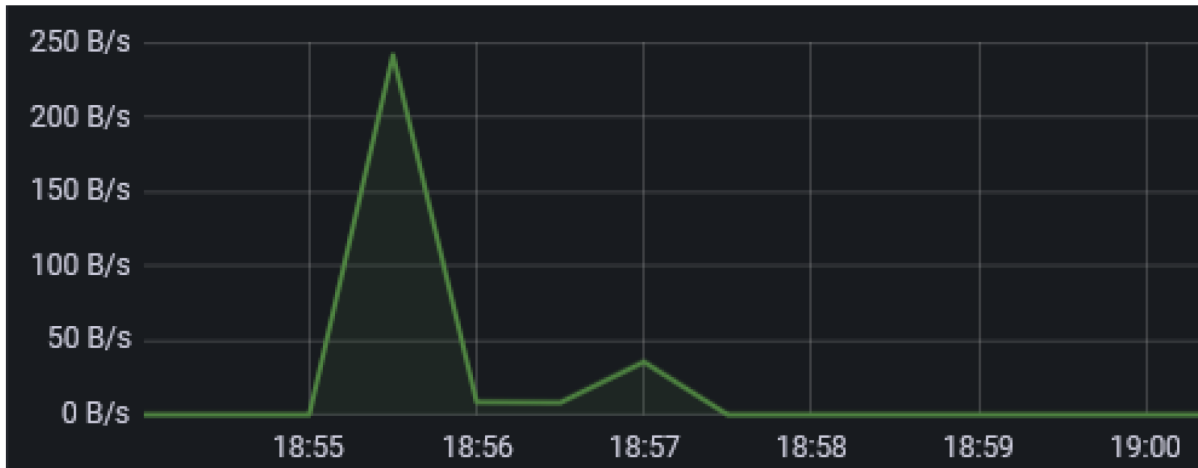
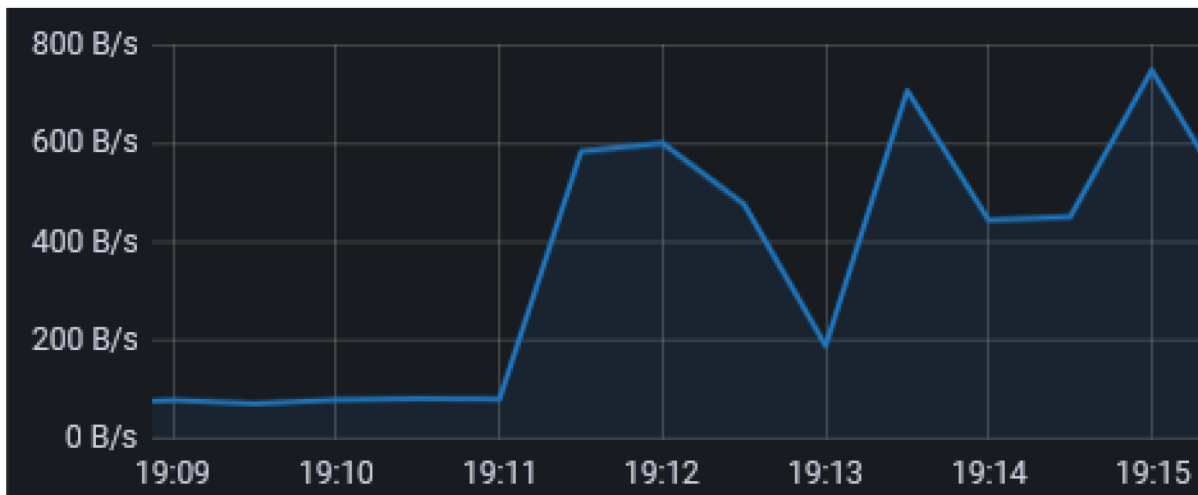


Figura 5.6: F4I OPC UA: Uso de Memoria (%)



**Figura 5.7:** WoT-IL: Datos transmitidos



**Figura 5.8:** F4I OPC UA: Datos transmitidos

Por último, se ha inspeccionado el número de mensajes perdidos. Todos los mensajes fueron entregados por el agente IoT, y las pérdidas fueron mínimas cuando se enviaron mayores tasas de carga de trabajo en el caso del componente WoT-IL. El retraso fue mayor en el agente F4I OPC UA cuando se actualizó una entidad FIWARE, como se muestra en la descripción parcial de los resultados en la Tabla 5.2

**Tabla 5.2:** Resultados comparativos del rendimiento de los componentes WoT-IL y F4I OPC UA bajo cargas de trabajo variadas.

Componente	Carga	Mensajes Entregados (Promedio)	Retraso (Tiempo Promedio (s))
WoT-IL	Baja	100 %	0.10
F4I OPC UA	Baja	100 %	0.13
WoT-IL	Media	$99.02 \pm 0.27$ %	0.32
F4I OPC UA	Media	$98.99 \pm 1.12$ %	0.58
WoT-IL	Alta	$98.32 \pm 1.06$ %	1.27
F4I OPC UA	Alta	$93.55 \pm 2.58$ %	1.59

El análisis revela que, si bien tanto el componente WoT-IL como el agente F4I OPC UA presentan altos índices de entrega de mensajes, WoT-IL demuestra una ligera ventaja, especialmente en condiciones de alta carga de trabajo. Esta ventaja de rendimiento se acentúa con el aumento de los tiempos de retardo del agente F4I OPC UA durante la actualización de entidades FIWARE. Esta comparación subraya la robustez y eficiencia de WoT-IL, mostrando su potencial para mejorar la interoperabilidad de la plataforma FIWARE y las capacidades de manejo de datos en tiempo real.

### 5.1.5 Análisis de Rendimiento en el Entorno Web of things Durante las Pruebas de Laboratorio

El principal objetivo de esta prueba fue evaluar la capacidad del componente WoT-IL para manejar eficientemente entornos de alta demanda de intercambio de datos, simulado mediante tres tipos de servidores: Servidor de Alto Volumen, Servidor de Datos Críticos, y Servidor de Bajo Rendimiento. Cada uno de estos servidores representó un tipo distinto de carga y complejidad, poniendo a prueba la adaptabilidad del sistema en diversas situaciones industriales.

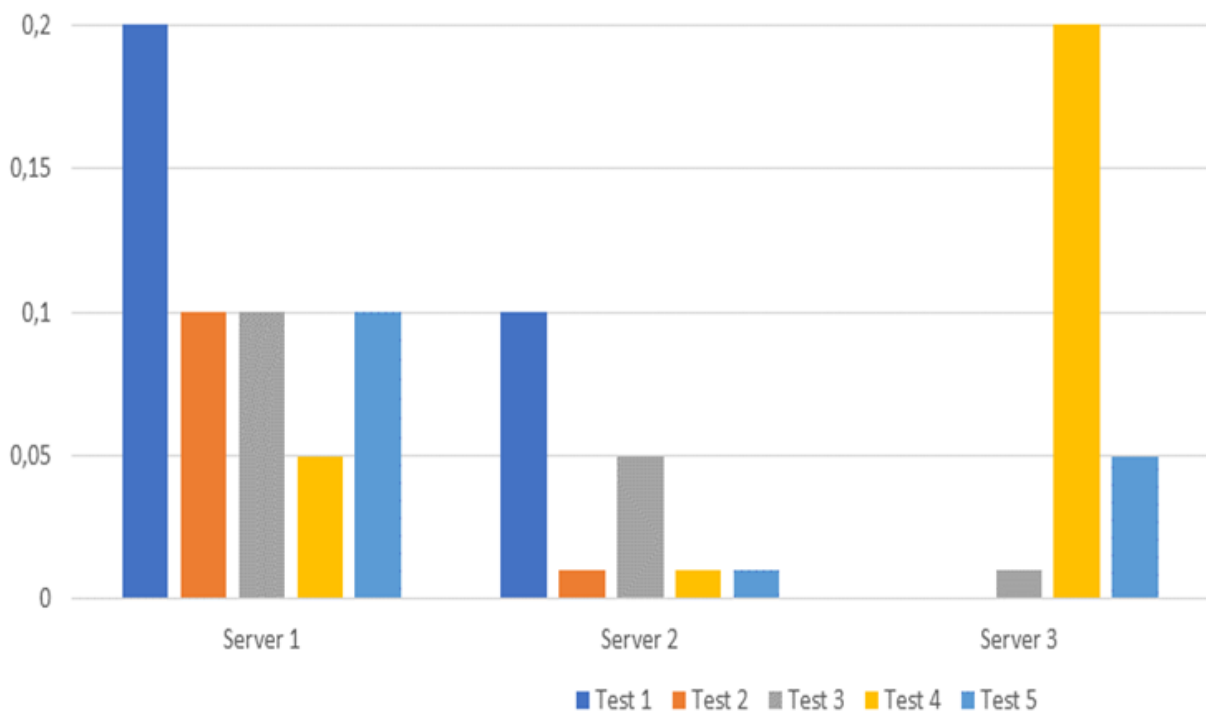
1. **Servidor de Alto Volumen:** Este servidor simulaba un entorno de alta frecuencia de mensajes y variabilidad de tipos de datos, lo que es común en industrias con procesos automatizados y que requieren un flujo constante de datos, como las fábricas automatizadas. En este caso, el WoT-IL demostró su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos sin perder eficiencia, manteniendo un uso optimizado de recursos y asegurando que las actualizaciones de los mensajes fueran rápidas y precisas.
2. **Servidor de Datos Críticos:** Aquí, el enfoque se centró en la gestión de datos críticos, los cuales requieren alta precisión y seguridad en la transmisión. Estos escenarios son típicos en operaciones de monitoreo y control, donde cualquier error en los datos puede afectar gravemente el proceso industrial. WoT-IL manejó con éxito la transmisión de estos datos críticos, garantizando que la integridad y exactitud de los mensajes no se vieran comprometidas.
3. **Servidor de Bajo Rendimiento:** Este servidor replicaba un entorno con limitaciones de hardware, simulando condiciones en pequeñas y medianas empresas (PYMES) donde los recursos computacionales pueden ser limitados. En estas condiciones, WoT-IL mostró ser capaz de adaptarse a entornos con menores capacidades, destacando

su robustez y capacidad para manejar sistemas con limitaciones sin sacrificar la precisión o la interoperabilidad.

Para garantizar que la traducción realizada por el *Consumidor de Contexto* y el *Convertidor TD* es correcta y completa, los mensajes producidos por el PLC se compararon con los mensajes publicados en el servidor WoT. De igual manera que en las pruebas de rendimiento en el entorno FIWARE, en este caso se validó la integridad de los mensajes traducidos comparando manualmente el número de TDs y verificando que el número era el mismo en todas las entradas y salidas. Asimismo, se validó que la traducción sea correcta comparando manualmente el contenido de todos los valores originados en el servidor OPC UA y verificando que eran los mismos en todas las TDs.

La Figura 5.9 muestra los resultados de eficiencia del componente WoT-IL en el descubrimiento y registro de NodeIDs de cada uno de los tres servidores en una serie de cinco pruebas. La figura representa el porcentaje de NodeIDs generados por los servidores que no fueron identificados y registrados. El promedio de mensajes generados y no registrados fue inferior al 0.1 %, destacando la eficacia del WoT-IL en entornos de alta demanda.

El enfoque estructurado de estas pruebas subraya la capacidad de adaptación y robustez del WoT-IL en entornos industriales complejos y diversos. El componente demostró su habilidad para manejar altos volúmenes de datos, asegurar la transmisión de datos críticos con precisión, y adaptarse a limitaciones de hardware sin comprometer la integridad de los mensajes o la eficiencia general del sistema.



**Figura 5.9:** Resultados de eficiencia del componente WoT-IL en el entorno Web of Things

## 5.2 Evaluación del Componente WoT-IL en Entornos Reales de los Pilotos de Gran Escala del Proyecto SHOP4CF

Esta sección se centra en contextualizar los pilotos llevados a cabo con el componente WoT-IL, específicamente en los contextos de los pilotos de gran escala de Arçelik y BOSCH. Se resumen los casos de uso implementados para evaluar la efectividad de WoT-IL dentro de la plataforma SHOP4CF y los componentes vinculados. En los pilotos de gran escala implementados con el componente WoT-IL dentro del marco del proyecto SHOP4CF, se evaluó su efectividad en contextos industriales como Arçelik y BOSCH. Estos pilotos buscaron integrar tecnologías como FIWARE y RAMI 4.0, combinando automatización y la interacción humana en procesos productivos. El enfoque incluyó la recolección y análisis de datos de dispositivos en la fábrica, simulación de procesos y la optimización de la comunicación en entornos industriales conectados, especialmente en escenarios de alta demanda de intercambio de datos.

En el caso de Arçelik, se probó la capacidad de WoT-IL para gestionar la automatización y supervisión de líneas de ensamblaje, utilizando herramientas de simulación y monitorización en tiempo real para mejorar la eficiencia operativa. Se aprovechó el *Data Collection Framework* (DCF), una herramienta clave para recopilar datos de sensores y estaciones de trabajo en tiempo real, proporcionando una visión clara de los flujos de producción y permitiendo la toma de decisiones más informadas.

Por otro lado, BOSCH implementó WoT-IL en sus procesos de manufactura avanzados, destacando en la integración de la robótica colaborativa. La plataforma facilitó la supervisión y control de procesos con cobots, donde el personal humano y las máquinas trabajaron de manera conjunta para mejorar la producción. Esta integración de tecnologías también permitió experimentar con diferentes modelos de producción a través de simulaciones, reduciendo los tiempos y costos de prueba.

Para la evaluación, se utilizó el marco de evaluación desarrollado dentro del marco del proyecto, que forma parte del trabajo suplementario alrededor de esta tesis, y descrito en (Abril-Jimenez et al., 2023). Este marco se describe brevemente a continuación.

### 5.2.1 Visión General del Ciclo de Vida del Experimento: Despliegue y Evaluación de Resultados

Para ofrecer una comprensión más clara de esta sección, es fundamental destacar el rol del componente WoT-IL dentro del proyecto SHOP4CF. WoT-IL no solo se evaluó por su desempeño en distintos escenarios de uso, sino que también sirvió como base fundamental para el desarrollo de otros componentes dentro del proyecto, proporcionando una solución integrada a los problemas planteados por los diferentes escenarios. Este enfoque colaborativo aseguró que el WoT-IL facilitara la integración de nuevas herramientas centradas en mejorar la interacción y el bienestar del trabajador, subrayando su versatilidad y eficacia. La capacidad del WoT-IL para integrarse y potenciar otros desarrollos dentro de SHOP4CF confirmó su valor como herramienta esencial, no solo en términos de interoperabilidad sino también en la facilitación del desarrollo de soluciones centradas en el humano en entornos industriales complejos.

En el contexto del proyecto SHOP4CF, se establecieron diversos KPIs para evaluar las soluciones propuestas, destacando el componente desarrollado en esta tesis. La definición de estos KPIs se llevó a cabo en estrecha colaboración con los trabajadores de los pilotos, con el objetivo de fundamentar y corroborar las mejoras en los procesos implicados en los escenarios de aplicación.

En este documento se presenta un resumen de los KPIs empleados para fines de evaluación, incluyendo sus valores iniciales. Por razones de confidencialidad asociadas a los datos reales de los KPIs, no se divulgarán los valores iniciales ni los obtenidos en las evaluaciones intermedias y finales en algunos casos. Sin embargo, se calculará el valor delta, representando el porcentaje de variación respecto al valor inicial del KPI en comparación con el logro al concluir el piloto.

### Piloto de Arçelik

El caso de uso de Arçelik dentro de la plataforma SHOP4CF se caracteriza por su enfoque en la interacción humana y el bienestar de los trabajadores en entornos automatizados. Este piloto tiene como objetivo no solo mejorar la eficiencia operativa, sino también fomentar un entorno de trabajo más inclusivo y adaptativo, asegurando que la tecnología implementada colabore de manera efectiva con los trabajadores, priorizando su comodidad y capacidad de interacción con las soluciones tecnológicas.

En este sentido, el componente WoT-IL jugó un papel fundamental al facilitar la interoperabilidad entre los dispositivos conectados y la plataforma SHOP4CF, asegurando la comunicación fluida y segura entre las distintas entidades tecnológicas. Esto es particularmente crucial en escenarios industriales donde los trabajadores interactúan directamente con los sistemas automatizados y robots, y donde el componente WoT-IL garantiza que los datos transmitidos entre el entorno físico y los sistemas digitales sean precisos y seguros. En el piloto, se integraron componentes clave para permitir esta interacción humano-máquina, destacando el uso de tecnologías de vanguardia como el control mediante gestos y la realidad aumentada para soportar la capacitación y operación de los trabajadores.

La Tabla 5.3 resume los componentes clave de SHOP4CF seleccionados inicialmente y aquellos finalmente integrados en el piloto de demostración, poniendo especial énfasis en la inclusión y el papel del componente WoT-IL.

**Tabla 5.3:** Resumen de los componentes desplegados y evaluados en el Caso de Uso de Arçelik. Fuente: Adaptada de (Abril-Jimenez et al., 2023).

Caso de uso	Componentes de SHOP4CF seleccionados inicialmente	Componentes de SHOP4CF finalmente desplegados
Asistencia remota AR para infraestructura de equipo	<i>AR based Teleassistance</i>	<i>AR based Teleassistance</i>
	<i>WoT-IL</i>	<i>WoT-IL</i>
	<i>FLINT (inicialmente denominado M3RCP)</i>	No utilizado en la versión final

Como se ha mencionado en el capítulo 3 de esta tesis doctoral, el objetivo principal de este

caso de uso es facilitar la asistencia remota al personal técnico de Arçelik para resolver problemas técnicos y de equipamiento. La razón de ser de este caso de uso es la necesidad de facilitar y hacer más eficiente la comunicación y el intercambio de información sobre maquinaria entre trabajadores ubicados en distintas fábricas. El proceso de integración de los componentes de SHOP4CF en el Caso de Uso de Arçelik se llevó a cabo en varias fases cuidadosamente planificadas y ejecutadas. A continuación, se detalla el proceso de integración, seguido de una comparación con los resultados de las encuestas realizadas posteriormente.

### **Fase de Integración:**

La fase inicial del proceso de integración se centró en la planificación y configuración del entorno. Durante las primeras dos semanas, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de los requisitos y se definieron los parámetros clave para la integración. Además, se configuró un entorno de pruebas que permitiera la integración gradual de los componentes. Esta fase fue crucial para establecer una base sólida y asegurar que todas las partes involucradas comprendieran los objetivos y las expectativas del proyecto.

Posteriormente, la integración de los componentes se llevó a cabo en un periodo de cuatro semanas. En las primeras dos semanas, se integró el componente WoT-IL. Esta integración incluyó la instalación del software, la configuración de las interfaces de usuario y la realización de pruebas unitarias para asegurar su funcionalidad. Una vez completada esta etapa, se procedió con la integración del componente de asistencia remota basada en realidad aumentada (AR based Teleassistance), lo cual tomó las siguientes dos semanas. Este componente fue probado rigurosamente para garantizar que pudiera conectarse y comunicarse eficientemente con los sistemas preexistentes de Arçelik.

Una vez integrados los componentes principales, se llevó a cabo una fase de pruebas de sistema y validación durante dos semanas. Durante este periodo, se realizaron pruebas exhaustivas para validar la correcta interacción entre los componentes integrados y los sistemas existentes. Las pruebas incluyeron escenarios de uso realistas para asegurar que los componentes funcionaran sin problemas en el entorno operativo de Arçelik. Los resultados de estas pruebas confirmaron que los componentes estaban correctamente integrados y eran funcionales.

La fase final del proceso de integración se centró en el desarrollo de funcionalidades adicionales. Durante tres semanas, se implementaron mejoras para optimizar la experiencia del usuario y la eficiencia operativa. Estas mejoras incluyeron ajustes en la interfaz de usuario y optimizaciones en la transmisión de datos. Al finalizar esta etapa, los desarrollos adicionales habían sido completados exitosamente, lo que permitió que el sistema estuviera listo para su despliegue en un entorno real.

### **Resultados de las Encuestas Posteriores:**

Una vez verificada la correcta integración del componente con los demás módulos que forman parte de la solución final, el sistema quedó en funcionamiento durante 6 meses, en los que participaron al menos 8 trabajadores manuales y 2 supervisores, donde se midieron los KPIs de evaluación definidos para este caso concreto de acuerdo a la herramienta descrita en la sección 3.4.2.

La Tabla 5.4 muestra la definición de KPIs relacionados con la mejora del rendimiento humano que proporciona la solución, pero solo mejoras técnicas o funcionales.

**Tabla 5.4:** KPIs y Valores de Referencia de la evaluación del caso de Uso de Arçelik

ID	Categoría	Especificación de Requerimientos	Definición de KPI	Valor de Referencia	Valor Final
<b>Requisitos de integración</b>					
T1.1	Seguridad y protección	Número de riesgos potenciales al realizar tareas de mantenimiento	El uso del componente para obtener asistencia en el mantenimiento reducirá la cantidad de riesgos presentes. La orientación de especialistas y las intervenciones precisas deberían resultar en menos riesgos.	63	52
<b>Requisitos de funcionalidad</b>					
T3.3	Movilidad	Número promedio de viajes a fábricas en el extranjero	El viaje de los especialistas es necesario en eventos de alta importancia. La eficacia del componente debería reducir las necesidades de viaje.	30 veces/año	15% menos
T3.7	Trazabilidad de los datos	Habilitar el flujo de datos al componente para su correcto funcionamiento	El flujo de datos al componente se verificará semanalmente para estar listo para una intervención.	Habilitado	Habilitado
T4.1	Productividad	Tiempo medio de las pérdidas de producción debidas a problemas de mantenimiento	El uso del componente debería reducir el tiempo de mantenimiento, lo que resultará en menos pérdidas. Se utilizarán informes de producción de ARC para eliminar instancias no relacionadas.	396 h/trimest.	Reducción del 20 %

Tabla 5.4: (Continuación)

ID	Categoría	Especificación de Requerimientos	Definición de KPI	Valor de Referencia	Valor Final
<b>Valores relacionados al ser humano</b>					
T4.4	Aceptación y usabilidad	Utilización del componente para la resolución de problemas	Número total de casos en los que se utiliza el componente para la resolución eficaz de problemas.	0	100 %

### Evaluación Cualitativa:

Esta evaluación cualitativa general se complementó con entrevistas y cuestionarios a los desarrolladores de SHOP4CF que participaron en las actividades de integración de componentes (véase la Tabla 5.4). Esto fue especialmente relevante para el proyecto, ya que los problemas inesperados en los escenarios reales con FIWARE requirieron de refinamientos y cambios de estrategia.

Como se ha indicado anteriormente, diez participantes intervinieron en las actividades de evaluación de la solución. Se trata de un número bajo de participantes, pero considerado suficiente a la hora de hacer una evaluación de usabilidad y debe tenerse en cuenta a la hora de interpretar los resultados de los cuestionarios. La puntuación de la escala de usabilidad del sistema (SUS) fue de 60, justo por debajo del umbral de 68. Esto sugiere que la usabilidad podría mejorarse un poco. Los resultados del cuestionario sobre factores humanos (véase la Figura 5.10) sugieren que los temas relacionados con los factores humanos estaban a un buen nivel. Sin embargo, aquí también se observa que, aunque el valor de usabilidad era bueno, era un poco inferior al de otros constructos. En el Anexo B es posible encontrar resultados más detallados.



**Figura 5.10:** Resultados del cuestionario de factores humanos para el caso de uso de Arcelik (Escala: 5 = Excelente; muy bien diseñado; 4 = Bueno; agradable de usar; 3 = Neutro; ni gusta ni disgusta; 2 = Deficiente; se sugiere investigar más, considerar cambios; 1 = Muy deficiente; se necesita investigar más, se deben implementar cambios). Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)

### Piloto de Bosch

El piloto de Bosch en el marco de la plataforma SHOP4CF se centra en la colaboración entre humanos y robots, un aspecto clave en la Industria 5.0 que busca una integración más eficiente y segura en los entornos industriales. Este caso de uso destaca el uso de una plataforma robótica móvil, diseñada para mejorar la interacción humano-robot en tareas colaborativas, como el ensamblaje y la manipulación de materiales en fábricas automatizadas.

Una de las principales contribuciones de Bosch en este piloto es la aplicación del componente WoT-IL, que facilita la interoperabilidad entre los diversos sistemas involucrados, permitiendo una comunicación fluida entre los robots, sensores y otros dispositivos. Este componente es crucial para asegurar que los sistemas colaborativos funcionen de manera sincronizada, mejorando tanto la productividad como la seguridad de los trabajadores que interactúan con estas soluciones tecnológicas avanzadas.

Los robots colaborativos (cobots), como los utilizados por Bosch, están diseñados para trabajar en entornos industriales donde la seguridad y la eficiencia son esenciales. Estos cobots están equipados con sensores avanzados que permiten detectar la presencia de humanos, lo que garantiza un entorno seguro. Bosch también ha contribuido al desarrollo de estos sistemas a través de tecnologías de visión que permiten a los robots operar en espacios compartidos con personas sin necesidad de barreras físicas.

En este piloto se implementó un caso de uso relacionado con la colaboración humano-robot,

incluyendo una plataforma robótica móvil. En estos casos de uso también se integró el componente WoT-IL, destacando su papel en la facilitación de la comunicación e interoperabilidad entre los distintos sistemas y componentes del caso de uso. La lista final de componentes utilizados se muestra en la Tabla 5.5.

En resumen, este piloto demuestra cómo las soluciones de WoT-IL y los robots colaborativos mejoran la eficiencia operativa al mismo tiempo que priorizan la seguridad y el bienestar de los trabajadores en entornos industriales.

**Tabla 5.5:** Resumen de los componentes finalmente desplegados y evaluados en el Caso de Uso de Bosch. Fuente: Adaptada de (Abril-Jimenez et al., 2023)

Caso de uso	Componentes de SHOP4CF seleccionados inicialmente	Componentes de SHOP4CF finalmente desplegados
Carga de material en varias líneas mediante robot móvil autónomo compartido	MPMS HA-MRN WoT-IL	MPMS HA-MRN WoT-IL

Este caso de uso, descrito previamente en la sección 3.4.1, se centra en la utilización de un brazo robótico montado sobre una plataforma AGV para alimentar las líneas de producción de la planta. Estas líneas cuentan con recursos cuya programación bajo demanda es complicada. El objetivo principal es automatizar tareas repetitivas, como la alimentación de las líneas, de manera que los trabajadores puedan enfocarse en otras actividades de mayor valor añadido.

La evaluación de este caso de uso, basada en KPIs, se llevó a cabo utilizando las métricas que se detallan en la Tabla 5.6. En general, se alcanzaron los valores objetivo previstos; sin embargo, el tiempo de inactividad en la línea B debido a la falta de material aumentó en un 1%. Esto puede deberse a que, durante las pruebas, la alimentación de las bandejas al robot se realizó de manera manual. No obstante, en un escenario de producción real, la alimentación de las bandejas sería gestionada por un dispensador autónomo, lo que evitaría este inconveniente.

### Proceso de Integración y Resultados de Encuestas:

El proceso de integración de los componentes de SHOP4CF en el Caso de Uso de Bosch se llevó a cabo en varias fases cuidadosamente planificadas y ejecutadas. A continuación, se detalla el proceso de integración, seguido de una comparación con los resultados de las encuestas realizadas posteriormente.

#### Fase de Integración:

La fase inicial del proceso de integración se centró en la planificación y configuración del entorno. Durante las primeras dos semanas, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de los requisitos y se definieron los parámetros clave para la integración. Además, se configuró un entorno de pruebas que permitiera la integración gradual de los componentes. Esta fase fue crucial para establecer una base sólida y asegurar que todas las partes involucradas comprendieran los objetivos y las expectativas del proyecto.

Posteriormente, la integración de los componentes se llevó a cabo en un periodo de cuatro semanas. En las primeras dos semanas, se integró el componente WoT-IL. Esta integración incluyó la instalación del software, la configuración de las interfaces de usuario y la realización de pruebas unitarias para asegurar su funcionalidad. Una vez completada esta etapa, se procedió con la integración del componente de asistencia remota basada en realidad aumentada (AR based Teleassistance), lo cual tomó las siguientes dos semanas. Este componente fue probado rigurosamente para garantizar que pudiera conectarse y comunicarse eficientemente con los sistemas preexistentes de Bosch.

Una vez integrados los componentes principales, se llevó a cabo una fase de pruebas de sistema y validación durante dos semanas. Durante este periodo, se realizaron pruebas exhaustivas para validar la correcta interacción entre los componentes integrados y los sistemas existentes. Las pruebas incluyeron escenarios de uso realistas para asegurar que los componentes funcionaran sin problemas en el entorno operativo de Bosch. Los resultados de estas pruebas confirmaron que los componentes estaban correctamente integrados y eran funcionales.

La fase final del proceso de integración se centró en el desarrollo de funcionalidades adicionales. Durante tres semanas, se implementaron mejoras para optimizar la experiencia del usuario y la eficiencia operativa. Estas mejoras incluyeron ajustes en la interfaz de usuario y optimizaciones en la transmisión de datos. Al finalizar esta etapa, los desarrollos adicionales habían sido completados exitosamente, lo que permitió que el sistema estuviera listo para su despliegue en un entorno real.

**Tabla 5.6:** KPIs y Valores de Referencia de la evaluación del Caso de Uso de Bosch. Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)

ID	Categoría	Especificación de Requerimientos	Definición de KPI	Valor de referencia del KPI	Valor intermedio del KPI
<b>Requisitos de integración</b>					
T1.1	Seguridad y protección	Reducir el estrés del trabajador humano que colabora con el robot.	Tiempo de inactividad debido a falta de material	13.497%	–

**Tabla 5.6:** (Continuación)

ID	Categoría	Especificación de Requerimientos	Definición de KPI	Valor de referencia del KPI	Valor intermedio del KPI
<b>Requisitos del proceso</b>					
T2.2	Procesamiento	Los trabajadores pueden centrarse en sus tareas principales en la producción sin asumir tareas adicionales.	Número de operadores por turno	Ver Anexo C	El indicador productivo de la línea mejora en promedio 1 punto
<b>Requisitos de funcionalidad</b>					
T3.5	Toma de Decisiones	Utilización eficiente del equipo sin comprometer la automatización.	Tiempo de inactividad debido a falta de material	Menos que el valor actual (confidencial)	Mismo valor
T3.7	Rastreabilidad de Datos	Aumentar la trazabilidad de materiales y procesos durante el transporte.	Tiempo de inactividad debido a falta de material	Línea A: 34 % Línea B: 4 %	Línea A: 20 % Línea B: 5 %
<b>Valores relacionados al ser humano</b>					
T4.4	Aceptación y Usabilidad	Motivación	Tiempo de inactividad debido a falta de material	Se espera una reducción del 3 %	3 %

**Evaluación Cualitativa:**

En esta etapa se contó con cuatro usuarios para realizar la evaluación de la usabilidad del sistema desplegado, un número suficiente según las evaluaciones de usabilidad básicas (Sauro y Lewis, 2016). Tras sus comentarios, la puntuación del cuestionario SUS fue de 54. Se considera que la usabilidad es buena si el valor medio de la puntuación SUS es superior a 68. Los aspectos a mejorar estaban relacionados con la complejidad y la facilidad de

aprendizaje de la solución.

En cuanto a las cuestiones relacionadas con los factores humanos, los participantes coincidieron en que todas eran buenas (por encima de la media, véase la Figura 5.11). Sin embargo, la usabilidad del caso de uso en conjunto se consideró media (3.3 sobre 5). Este resultado coincide con los resultados del cuestionario SUS. El ámbito mejor valorado fue la ergonomía, muy cerca de la utilidad y la ética. Los resultados completos se pueden ver en el Anexo B.



**Figura 5.11:** Resultados del cuestionario de factores humanos para el caso de uso de BOSCH (Escala: 5 = Excelente; muy bien diseñado; 4 = Bueno; agradable de usar; 3 = Neutro; ni gusta ni disgusta; 2 = Deficiente; se sugiere investigar más, considerar cambios; 1 = Muy deficiente; se necesita investigar más, se deben implementar cambios). Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)

### Comparación entre las soluciones de los casos de uso de Arçelik y Bosch

En la comparación de soluciones entre los casos de uso de Arçelik y Bosch, ambos enfoques abordan la eficiencia del trabajador y la colaboración humano-robot, pero lo hacen desde ángulos diferentes y con metodologías específicas. En el caso de Bosch, la solución está diseñada para reducir el estrés de los trabajadores al interactuar con robots, lo que permite a estos trabajadores enfocarse en sus tareas principales. Esto se logra mediante una mejora en la trazabilidad de materiales y procesos durante el transporte, facilitando una integración más fluida entre el trabajo humano y el automatizado. La priorización y los índices de alineación para estos requisitos se calculan utilizando el marco desarrollado en el estudio *Enhancing worker-centred digitalisation in industrial environments: A KPI evaluation methodology* (Abril-Jiménez et al., 2024). Este marco proporciona una evaluación cuantitativa que ayuda a identificar las áreas críticas donde la inversión en recursos humanos puede maximizar el beneficio percibido. La Tabla 5.11 del informe resume estos valores de priorización y los índices calculados, reflejando cómo las inversiones en la adaptación y el soporte de los trabajadores frente a la automatización pueden optimizar la colaboración y la eficiencia operativa.

En contraste, el caso de uso de Arçelik podría presentar un enfoque diferente, posiblemente con otras prioridades y metodologías para abordar la eficiencia y la colaboración, lo que subraya la importancia de entender las soluciones específicas de cada empresa en el contexto de sus necesidades y objetivos particulares.

### **Caso de Uso de Bosch: Cálculo de Tasa de Priorización e Índices de Alineación, Inversión en Recursos Humanos y Beneficio Percibido**

En el caso de uso de Bosch, los requisitos específicos se centran en reducir el estrés de los trabajadores humanos cuando colaboran con robots, permitir que los trabajadores se concentren en sus tareas principales, y mejorar la trazabilidad de materiales y procesos durante el transporte. La Tabla 5.7 resume los valores de priorización y los índices calculados para estos requisitos.

**Tabla 5.7:** Caso de Uso de BOSCH

ID	Especificación del Requisito	Trabajador Manual	Gestión de Producción	Empresa	Índice de Alineación	Índice de Inversión en RRHH	Índice de Beneficio Percibido
T1.1	Reducir el estrés del trabajador humano trabajando colaborativamente con el robot.	0.5	0.01	0.05	0.18	0.075	0.18
T2.2	Los trabajadores pueden centrarse en sus tareas principales sin asumir tareas adicionales.	0.1	0.2	0.3	0.2	0.15	0.3
T3.5	Utilización eficiente del equipo sin comprometer la automatización.	0.1	0.2	0.3	0.13	0.1	0.2
T3.7	Aumentar la trazabilidad de materiales y procesos durante el transporte.	0.1	0.4	0.3	0.04	0.25	0.267
T4.4	Motivación	0.2	0.1	0.05	0.05	0.15	0.116

### Caso de Uso de Arçelik: Aumento de la Eficiencia del Trabajador y Cálculo de Índices de Alineación e Inversión en Recursos Humanos

El caso de uso 2 de Arçelik se enfoca en aumentar la eficiencia del trabajador y mejorar la ergonomía de las estaciones de trabajo. Los requisitos específicos incluyen la disminución de errores en el ensamblaje, cumplimiento de la duración de las operaciones, y la ergonomía de las estaciones de trabajo. La Tabla 5.8 muestra los valores de priorización y los índices calculados de acuerdo al procedimiento descrito en el artículo *Enhancing worker-centred digitalisation in industrial environments: A KPI evaluation methodology* (Abril-Jiménez et al., 2024).

Tabla 5.8: Caso de Uso de Argelik

ID	Especificación del Requisito	Trabajador Manual	Equipo SHOP4CF	Líder de Turno	Gestión de Producción	Salud y Seguridad Ocupacional	Ingeniero de Producción	Empresa	Índice de Aliación	Índice de Inversión en RRHH	Índice de Beneficio Percibido
T2.1	Disminución del número de errores detectados por el control de calidad en la sección de ensamblaje donde el componente está activo.	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.1	0.096	0.22	0.157
T3.4	Mejor cumplimiento de la duración de operación de las estaciones de trabajo interesadas.	0.2	0.1	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.224	0.28	0.2

Tabla 5.8: (Continuación)

ID	Especificación del Requisito	Trabajador Manual	Equipo SHOP4CF	Líder de Turno	Gestión de Producción	Salud y Seguridad Ocupacional	Ingeniero de Producción	Empresa	Índice de Aliación	Índice de Inversión en RRHH	Índice de Beneficio Percibido
T3.7	Proporcionar datos al componente para la optimización del proceso mediante rotaciones inteligentes.	0.1	0.3	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.096	0.22	0.157
T4.4	Investigaciones sobre ergonomía y equilibrio de la estación de trabajo.	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.356	0.34	0.242
T4.6	Número total de incidentes laborales en la sección.	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2	0.3	0.352	0.34	0.242

## Comparación de Resultados

La comparación entre los casos de uso de Bosch y Arçelik destaca diferencias significativas en cómo cada compañía prioriza la interacción humano-robot, la optimización de procesos, y la gestión de recursos humanos. A continuación, se analizan más a fondo los resultados de las Tablas 5.7 y 5.8 de la sección anterior, evaluando las diferencias y similitudes en los índices de Alineación (AI), Inversión en Recursos Humanos (HRI), y Beneficio Percibido (PBI) para cada requisito especificado.

### Enfoque en Reducción del Estrés y Mejora de la Trazabilidad

Bosch se destaca por su énfasis en la reducción del estrés de los trabajadores al colaborar con robots, como lo demuestra su índice de Alineación (AI) de 0.18, una Inversión en Recursos Humanos (HRI) de 0.075 y un Beneficio Percibido (PBI) de 0.18 en el requisito T1.1. Este enfoque busca mejorar la interacción humano-robot, optimizando el equilibrio entre la automatización y el bienestar del trabajador. Bosch también valora la trazabilidad durante el transporte, con un alto PBI de 0.267 en T3.7, subrayando su objetivo de mejorar la seguridad y la eficiencia sin sacrificar la automatización.

En contraste, Arçelik pone un fuerte énfasis en la ergonomía y el balance en las estaciones de trabajo, como se refleja en su AI de 0.356, HRI de 0.34 y PBI de 0.242 en T4.4. Este enfoque indica un compromiso significativo con el bienestar del trabajador, así como una reducción de los incidentes laborales, evidenciado por su AI de 0.352, HRI de 0.34 y PBI de 0.242 en T4.6.

### Optimización de Procesos y Participación del Trabajador

Bosch se centra en optimizar el uso de equipos mediante la automatización inteligente y en mejorar la eficiencia del trabajador, con un AI de 0.13 y un PBI de 0.2 en T3.5. Este enfoque refleja un equilibrio entre la incorporación de tecnología avanzada y la participación activa del trabajador, buscando maximizar la productividad sin desatender el impacto humano.

Por otro lado, Arçelik prioriza la reducción de errores en la producción y el cumplimiento de los tiempos de operación, con un AI de 0.224, HRI de 0.28 y PBI de 0.2 en T3.4. Esto sugiere que Arçelik valora la precisión y la eficiencia en sus procesos, integrando la tecnología para mejorar directamente la productividad y la calidad del trabajo, y evidenciando una fuerte orientación hacia la optimización del rendimiento operativo.

### Diferencias en la Valoración de la Tecnología y el Impacto Humano

Las diferencias en los índices de HRI y PBI entre Bosch y Arçelik reflejan enfoques distintos en la valoración de la tecnología y su impacto humano. Bosch muestra índices generalmente más bajos en comparación con Arçelik, lo que podría indicar una menor percepción del beneficio humano directo o una inversión menos enfocada en los aspectos humanos de la tecnología. Esto se evidencia en la menor puntuación de motivación, con un PBI de 0.116 en T4.4, y en la trazabilidad de materiales, con un PBI de 0.267 en T3.7.

En contraste, Arçelik demuestra altos índices en todas las categorías relacionadas con ergonomía y balance en las estaciones de trabajo, como se observa en su HRI de 0.34 y PBI de 0.242 en T4.4. Esto sugiere un enfoque más centrado en el aspecto humano y un mayor reconocimiento del impacto positivo de la tecnología en el bienestar de los trabajadores. En resumen, mientras Bosch busca un equilibrio entre tecnología y eficiencia operativa, Arçelik

pone un énfasis más marcado en el bienestar humano y la reducción de incidentes laborales, reflejando así diferentes prioridades en la implementación de soluciones tecnológicas.

### **Evaluación y Adopción de WoT-IL en pymes mediante Convocatorias Abiertas del Proyecto SHOP4CF**

En el marco del proyecto SHOP4CF, el componente WoT-IL demostró ser un facilitador crítico para la interoperabilidad en las pymes, especialmente diseñado para mejorar la adaptabilidad, la integración y la economía de su implementación en ambientes industriales. Este componente fue puesto a prueba en dos de las tres convocatorias abiertas del proyecto, revelando su potencial en entornos reales enfocados en las pymes, como se describe en el Anexo D.

Las convocatorias abiertas, conocidas como *Financial Support for Third Parties* (FSTP), proporcionaron una plataforma ideal para evaluar la aceptación y la eficacia del WoT-IL en un contexto dinámico y variado. Las pymes participantes en la segunda y tercera convocatoria utilizaron este componente para facilitar la traducción de datos entre diferentes estándares, resaltando su utilidad en la simplificación de procesos técnicos complejos.

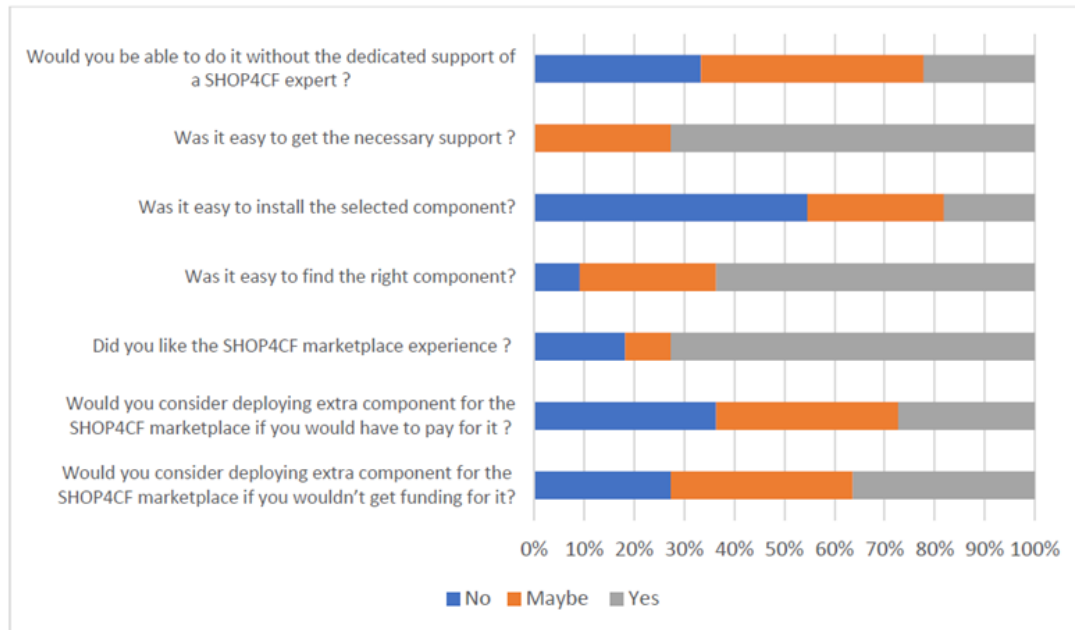
#### **Segunda Convocatoria Abierta de SHOP4CF**

En el contexto de la segunda convocatoria abierta de SHOP4CF, WoT-IL se destacó como un facilitador esencial para la interoperabilidad en pequeñas y medianas empresas (pymes). Este escenario, que simuló un entorno con una alta necesidad de intercambio de datos, permitió evidenciar cómo WoT-IL facilita la traducción de datos entre distintos estándares y protocolos. Su capacidad para simplificar procesos técnicos complejos y mejorar la adaptabilidad resultó crucial para la integración de tecnologías avanzadas en las operaciones diarias de las pymes.

La aplicación de KPIs centrados en factores humanos durante esta convocatoria subraya la orientación del componente hacia la mejora de la interacción humano-máquina y la experiencia del usuario. Esta perspectiva se refleja en la manera en que WoT-IL se adapta a diversas configuraciones, permitiendo una implementación más fluida y eficiente de tecnologías emergentes. La herramienta no solo simplifica la integración de diferentes sistemas, sino que también optimiza la comunicación entre los distintos componentes tecnológicos, asegurando que los procesos sean más coherentes y menos propensos a errores.

En la Figura 5.12, que ilustra los resultados de la experiencia de los desarrolladores con WoT-IL y otros componentes del proyecto SHOP4CF, se observa una evaluación generalmente positiva. Los desarrolladores destacaron la facilidad de integración del componente y el sólido soporte recibido durante las pruebas. Esto indica que WoT-IL no solo facilita la interoperabilidad técnica, sino que también contribuye a una experiencia más satisfactoria para los usuarios al reducir la complejidad de la implementación y asegurar una integración más fluida de los sistemas.

La capacidad de WoT-IL para ser adaptado a diferentes configuraciones y su enfoque en factores humanos resalta su papel como una herramienta clave en la mejora de la interoperabilidad en el entorno de las pymes. Al permitir una mejor comunicación entre sistemas y simplificar el manejo de datos, WoT-IL juega un papel fundamental en la evolución hacia una industria más conectada y eficiente, alineando las capacidades tecnológicas con las necesidades prácticas de los usuarios y los procesos empresariales cotidianos.



**Figura 5.12:** Resultados del cuestionario de integradores y desarrolladores relacionados con la experiencia de desarrollo e integración. Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)

Los resultados obtenidos de la segunda convocatoria abierta proporcionan una visión general del desempeño del componente WoT-IL, en lugar de centrarse en una solución o experimento específico. La escala de usabilidad del sistema (SUS) alcanzó una puntuación de 73, indicando que la usabilidad de WoT-IL fue percibida como buena en esta convocatoria, al superar el valor umbral de 68. Resultados igualmente positivos se obtuvieron en relación con los aspectos de factores humanos (ver Figura 5.13).

En la segunda convocatoria abierta de SHOP4CF, se incluyó un análisis adicional sobre las percepciones de los participantes respecto al uso futuro de las soluciones tecnológicas implementadas. En este análisis, se realizaron dos preguntas clave para evaluar las actitudes hacia la tecnología y su impacto en el entorno laboral.

Primero, se investigó si los participantes tenían preocupaciones sobre la posibilidad de que las soluciones tecnológicas implementadas pudieran reemplazar sus puestos de trabajo. Según los resultados obtenidos, que se muestran en la Figura 5.14, la mayoría de los participantes no expresaron temor de que la tecnología reemplazara sus roles. Esto sugiere una actitud positiva hacia la integración de nuevas tecnologías, donde los trabajadores ven las soluciones no como una amenaza, sino como una oportunidad para mejorar su entorno laboral y sus procesos de trabajo.

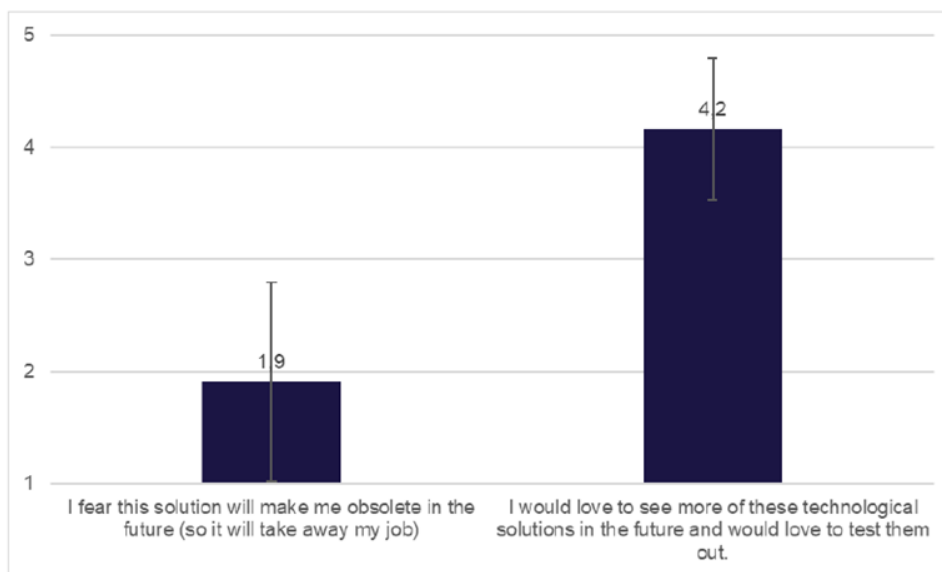
En segundo lugar, los participantes manifestaron un notable interés en ver y probar estas soluciones tecnológicas en el futuro. Este entusiasmo por experimentar con nuevas tecnologías refleja una apertura y curiosidad por explorar cómo estas innovaciones pueden integrarse en sus operaciones diarias. Este interés puede estar vinculado a la percepción de que estas tecnologías ofrecen mejoras significativas en la eficiencia, la calidad del trabajo y la facilidad de uso, en lugar de simplemente sustituir roles humanos.

Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que han demostrado que la adopción de nuevas tecnologías en el lugar de trabajo puede ser vista positivamente cuando los empleados perciben que estas herramientas les ayudarán a realizar su trabajo de manera



**Figura 5.13:** Resultados del cuestionario de factores humanos para la segunda convocatoria abierta (Escala: 5 = Excelente; 4 = Bueno; 3 = Neutral; 2 = Pobre; 1 = Muy pobre). Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)

más efectiva y no simplemente a reemplazar sus funciones. Por ejemplo, investigaciones han mostrado que el impacto positivo de la tecnología en la productividad y la reducción de tareas repetitivas puede fomentar una actitud receptiva entre los trabajadores (Bessen, 2019).



**Figura 5.14:** Resultados de dos preguntas adicionales (5 = totalmente de acuerdo, 1 = totalmente en desacuerdo). Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)

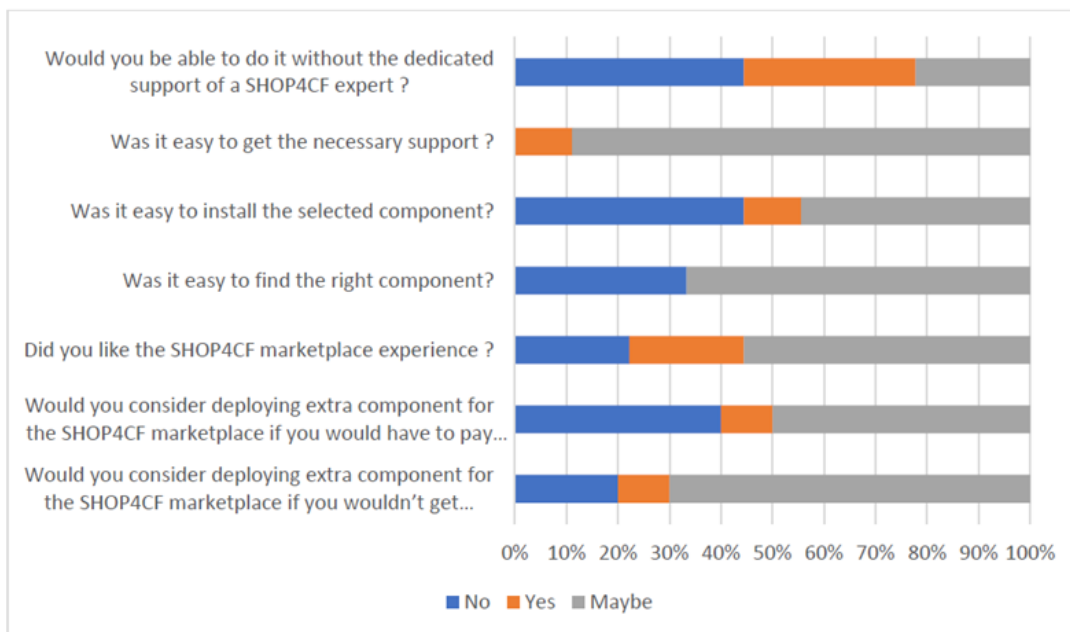
### Tercera Convocatoria Abierta de SHOP4CF

La tercera convocatoria abierta proporcionó una plataforma adicional para evaluar la eficacia de WoT-IL en un contexto dinámico y variado. Las pymes participantes utilizaron este componente para optimizar la gestión dinámica de las tareas en líneas de producción, destacando su utilidad en la mejora continua y adaptativa de los procesos industriales.

En la segunda convocatoria abierta de SHOP4CF, los KPIs relacionados con factores humanos jugaron un papel fundamental, subrayando la importancia de la usabilidad y la aceptación del componente WoT-IL en la experiencia de los trabajadores. La atención al diseño centrado en el usuario y la experiencia general resultó ser una prioridad, reflejando un impacto positivo en cómo los trabajadores interactúan con las soluciones tecnológicas implementadas.

La integración del componente WoT-IL junto con otros elementos del proyecto SHOP4CF demostró ser significativamente más eficiente en comparación con enfoques que no utilizaban un sistema integrado. Esto se evidencia en la menor carga de trabajo para los integradores y desarrolladores cuando se empleó WoT-IL, resaltando su eficacia en la facilitación de procesos en entornos industriales reales. La capacidad de WoT-IL para simplificar la integración de diferentes tecnologías y sistemas contribuye a una implementación más fluida y menos propensa a problemas técnicos, como se observa en estudios anteriores que destacan la importancia de la interoperabilidad para la eficiencia operativa en la industria (Hermann et al., 2016; L. D. Xu et al., 2018).

Además, los resultados del cuestionario aplicado a integradores y desarrolladores revelaron una alta valoración de la usabilidad y la funcionalidad de WoT-IL. Los participantes destacaron la adaptabilidad del componente y su facilidad de integración en el entorno de trabajo, lo que se refleja en la Figura 5.15 del informe. La retroalimentación positiva subraya que WoT-IL no solo cumple con los requisitos técnicos, sino que también mejora la experiencia de los usuarios al reducir la complejidad y facilitar una adaptación más rápida a las nuevas tecnologías. Esto es consistente con la literatura sobre la importancia de la usabilidad en la adopción de nuevas tecnologías, que señala que la facilidad de uso y la adaptabilidad son cruciales para la aceptación general y el éxito en la implementación de soluciones tecnológicas.



**Figura 5.15:** Resultados del cuestionario de integradores y desarrolladores relacionado con la experiencia de desarrollo e integración. Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)

En el caso de esta tercera convocatoria abierta, la puntuación en la Escala de Usabilidad

del Sistema (SUS) fue de 68, indicando que la usabilidad del componente WoT-IL fue percibida como buena. Se obtuvieron resultados igualmente positivos de las preguntas relacionadas con factores humanos (ver Figura 5.16)



**Figura 5.16:** Resultados del cuestionario de factores humanos para la segunda convocatoria abierta (Escala: 5 = Excelente; 4 = Bueno; 3 = Neutral; 2 = Pobre; 1 = Muy pobre). Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)

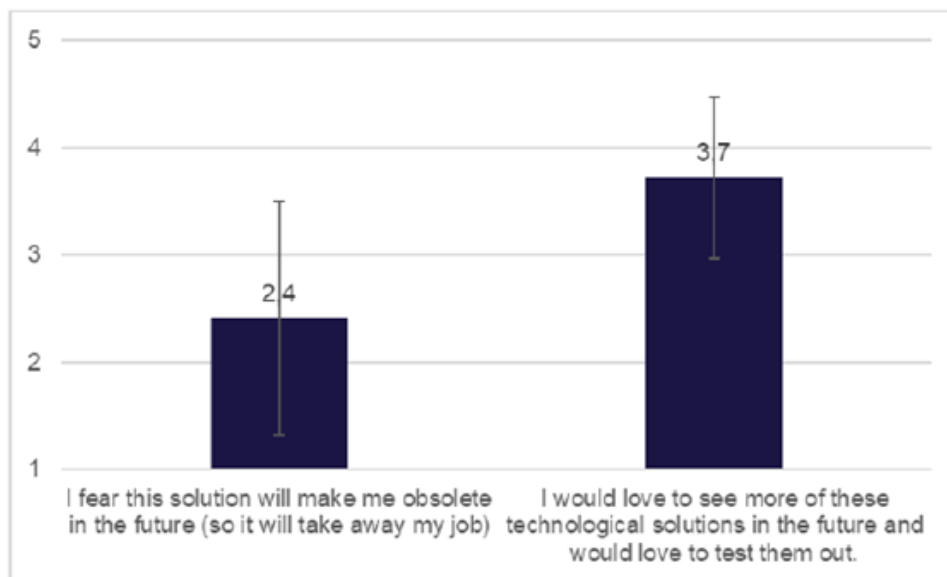
En la tercera convocatoria abierta de SHOP4CF, se realizaron dos preguntas adicionales para evaluar las percepciones de los participantes sobre el uso futuro de las soluciones implementadas, incluido el componente WoT-IL. Los resultados, como se muestra en la Figura 5.17, revelaron que los participantes no tenían preocupaciones significativas de que estas tecnologías, incluyendo WoT-IL, pudieran reemplazar sus empleos. En cambio, mostraron un interés genuino en seguir experimentando y adoptando este tipo de tecnologías en el futuro.

La falta de preocupación por la sustitución de empleos con la implementación de tecnologías avanzadas como WoT-IL es consistente con estudios que indican que la percepción de la tecnología como una herramienta para mejorar la eficiencia y la productividad, en lugar de reemplazar trabajadores, puede influir positivamente en la aceptación de la misma. Investigaciones han demostrado que los empleados tienden a ver las tecnologías innovadoras como oportunidades para mejorar su trabajo y desarrollar nuevas habilidades, en lugar de amenazas a sus puestos de trabajo (Arntz et al., 2016; Bessen et al., 2020).

Además, el interés en continuar experimentando y adoptando estas tecnologías sugiere una recepción positiva hacia la innovación. Los participantes valoran las mejoras que las tecnologías como WoT-IL pueden ofrecer en términos de eficiencia operativa, adaptabilidad y capacidad para simplificar procesos complejos. Esto está en línea con estudios sobre la aceptación de la tecnología, que han encontrado que la disposición a adoptar nuevas tecnologías a menudo está relacionada con la percepción de sus beneficios tangibles y la facilidad con la que se integran en los procesos existentes (Venkatesh et al., 2003).

La recepción positiva hacia WoT-IL, reflejada en los resultados del cuestionario, destaca la

eficacia del componente en mejorar la experiencia de los usuarios y facilitar una integración más fluida en el entorno laboral. Los participantes no solo aceptan la tecnología, sino que también están motivados para explorar más a fondo sus aplicaciones y beneficios futuros. Esto sugiere que WoT-IL no solo cumple con los requisitos técnicos, sino que también contribuye a un ambiente de trabajo más positivo y proactivo hacia la adopción de innovaciones tecnológicas.



**Figura 5.17:** Resultados de dos preguntas adicionales (5 = totalmente de acuerdo, 1 = totalmente en desacuerdo). Fuente: (Abril-Jimenez et al., 2023)

Es importante destacar que el éxito de WoT-IL en estas convocatorias se evidenció en la significativa reducción del tiempo de desarrollo de aplicaciones, con un 80% de los adoptantes informando ahorros de más de cuatro jornadas laborales en el desarrollo de sus aplicaciones deseadas. Además, la curva de aprendizaje para la integración del componente fue considerada baja por el 89% de los participantes, indicativo de la facilidad de uso y la accesibilidad del WoT-IL para los usuarios finales.

Este análisis confirma la relevancia de WoT-IL no solo como un componente técnico sino como una solución estratégica para las pymes, alineándose con las necesidades de digitalización y automatización eficiente en el sector. La aceptación y los resultados positivos en estas convocatorias abiertas subrayan la capacidad de WoT-IL para actuar como un puente en la transformación digital de las pymes, facilitando la integración sin fricciones de tecnologías avanzadas en sus operaciones diarias.

# Capítulo 6

## Discusión y Conclusiones

Este capítulo constituye una reflexión integral sobre los resultados obtenidos en la investigación llevada a cabo en esta tesis doctoral, que ha explorado profundamente el impacto de la Interoperabilidad Semántica Industrial. El trabajo de investigación llevado a cabo se ha centrado en cómo esta puede facilitar y optimizar la TD de los sistemas industriales. A través del desarrollo y la implementación del componente WoT-IL, este estudio ha buscado no solo demostrar la funcionalidad técnica de las soluciones propuestas, sino también evaluar su efectividad en mejorar la integración del trabajador y la eficiencia operativa en un entorno centrado en el humano.

La discusión se enfoca en cómo los hallazgos responden a las hipótesis planteadas y las preguntas de investigación formuladas al inicio de esta investigación. Se analiza la relevancia de los resultados en el contexto de los rápidos cambios tecnológicos y la creciente necesidad de sistemas que no solo sean eficientes desde el punto de vista técnico, sino también inclusivos y adaptativos a las necesidades humanas. La interoperabilidad y la compartición de datos se destacan como aspectos fundamentales para el futuro del sector industrial, especialmente en Europa, donde la transformación digital y la integración de tecnologías avanzadas son claves para mantenerse competitivo a nivel global. Una solución que facilite estos aspectos no solo optimiza los procesos productivos, sino que también promueve la colaboración entre diferentes entidades y sistemas, mejorando la flexibilidad y resiliencia de las operaciones industriales.

Además, esta tesis doctoral contribuye significativamente al cuerpo de conocimiento existente sobre interoperabilidad y transformación digital, ofreciendo un modelo de referencia para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos en el sector. En particular, el enfoque adoptado en este trabajo, que inicialmente se alineaba con los principios de la Industria 4.0, ha demostrado una notable capacidad de adaptación al paradigma emergente de la Industria 5.0, que pone un mayor énfasis en la colaboración hombre-máquina y la personalización de los procesos industriales. Algo similar a lo que ocurrió con el proyecto SHOP4CF, que comenzó con un enfoque en la digitalización y automatización de procesos industriales, ha evolucionado para incorporar principios de la Industria 5.0, subrayando la importancia de crear soluciones tecnológicas que no solo optimicen la producción, sino que también mejoren la calidad de vida de los trabajadores y sean sostenibles a largo plazo.

Los beneficios de este desarrollo se extienden a múltiples *stakeholders*. Los desarrolladores, por ejemplo, han encontrado en el componente WoT-IL una herramienta poderosa para establecer un lenguaje común de interoperabilidad, lo que simplifica la integración de

sistemas diversos y acelera el desarrollo de nuevas aplicaciones y servicios. Además, los trabajadores del sector industrial se beneficiarán significativamente de la adopción de principios de la Industria 5.0, que se centran en crear un entorno laboral más seguro, eficiente y humano. Al reducir las tareas repetitivas y de bajo valor, los trabajadores pueden enfocarse en actividades que requieren habilidades humanas únicas, como la resolución de problemas y la innovación, mejorando así su satisfacción y bienestar laboral. En última instancia, este enfoque no solo beneficia a las empresas, que pueden mejorar su productividad y adaptabilidad, sino también a la sociedad en general, al promover una industria más sostenible y centrada en el humano.

Las conclusiones derivadas de este trabajo de investigación buscan ofrecer una perspectiva detallada y argumentada sobre el valor añadido de integrar estándares de interoperabilidad en los procesos industriales, resaltando específicamente las bondades del componente WoT-IL frente a otras soluciones existentes. WoT-IL no solo facilita la integración de datos entre sistemas heterogéneos, sino que también proporciona una plataforma robusta y adaptable que mejora la eficiencia y seguridad operativa. Este componente se distingue por su capacidad para manejar una amplia variedad de dispositivos y protocolos, garantizando una comunicación fluida y eficiente en entornos industriales complejos.

Lo que hace que WoT-IL sea especialmente valioso es su enfoque en la interoperabilidad semántica, que ha transformado la manera en que la industria percibe y gestiona el intercambio de datos. Al permitir una interpretación y utilización coherente de los datos a través de diferentes plataformas, WoT-IL no solo optimiza los procesos internos, sino que también facilita la colaboración y la innovación interorganizacional. Esta capacidad de interoperabilidad semántica, combinada con su arquitectura eficiente y segura, ofrece a las empresas una herramienta poderosa para enfrentar los desafíos de la digitalización y avanzar hacia una Industria 5.0 más centrada en el humano.

Este capítulo concluye con una reflexión sobre las implicaciones prácticas de estos hallazgos, destacando cómo el componente WoT-IL ha cambiado la visión de la interoperabilidad en la industria, haciendo que la adopción de tecnologías avanzadas sea más accesible y beneficiosa. Además, se identifican las limitaciones del estudio, como la necesidad de pruebas en una gama más amplia de escenarios industriales, y se sugieren posibles direcciones para investigaciones futuras en este campo dinámico y crítico. Estas investigaciones podrían explorar aún más la integración de WoT-IL con nuevas tecnologías emergentes y expandir su aplicabilidad en diversos sectores, asegurando que la industria continúe evolucionando hacia una mayor eficiencia, seguridad y humanidad.

## 6.1 Discusión

La investigación realizada en esta tesis doctoral subraya el papel fundamental de la Interoperabilidad Semántica en el ámbito industrial, resaltando cómo esta puede actuar como catalizador para una mayor eficiencia y adopción de tecnologías centradas en el ser humano. A través del desarrollo y la implementación de WoT-IL, se ha demostrado cómo estas tecnologías facilitan una integración humana más profunda en los procesos de Transformación Digital. Este enfoque no solo mejora la comunicación entre sistemas y componentes industriales diversos, sino que también asegura una colaboración segura y efectiva entre humanos y máquinas, destacando la importancia de mantener al ser humano en el centro de cualquier proceso de TD.

### 6.1.1 Interacción entre Hipótesis y Hallazgos

#### H1: Mejora de la Eficiencia y Seguridad

Los resultados obtenidos con WoT-IL han confirmado que la implementación de estándares de interoperabilidad, como la Web Semántica, mejora significativamente la eficiencia y la seguridad en entornos industriales. La capacidad de WoT-IL para integrar y procesar datos de múltiples dispositivos y sistemas se ha demostrado crucial para superar los desafíos de comunicación entre sistemas heterogéneos. Como se detalla en las subsecciones 5.1.4 y 5.1.5 de la sección 5.1 *Validación Técnica*, WoT-IL logró mantener una alta precisión en la conversión de datos y una baja latencia en la comunicación entre sistemas. Estos resultados son consistentes con la literatura sobre la interoperabilidad y los beneficios de los estándares de la Web Semántica en entornos industriales. Por ejemplo, estudios han demostrado que la Web Semántica puede mejorar la interoperabilidad al proporcionar una estructura común para el intercambio de datos, facilitando la integración de sistemas y la mejora de la eficiencia operativa. La baja latencia y alta precisión observadas en WoT-IL también contribuyen a una mayor seguridad operativa, al reducir el riesgo de errores en la transmisión de datos y mejorar la fiabilidad del sistema.

La integración de herramientas como Prometheus y cAdvisor para la monitorización del rendimiento jugó un papel crucial en la identificación y resolución de cuellos de botella potenciales. Estas herramientas permitieron una evaluación continua del rendimiento, asegurando que los sistemas operen de manera óptima y abordando problemas antes de que afecten la eficiencia y la seguridad. La experiencia con WoT-IL subraya la importancia de contar con una infraestructura robusta para soportar la interoperabilidad en entornos industriales. La capacidad de WoT-IL para integrarse de manera efectiva con otros sistemas y estándares demuestra que una base sólida y bien diseñada es fundamental para facilitar la transformación digital. La interoperabilidad no solo mejora la comunicación entre sistemas, sino que también proporciona una base sólida para la implementación de tecnologías avanzadas, permitiendo a las empresas aprovechar las oportunidades de la digitalización y la automatización.

Los resultados obtenidos con WoT-IL destacan su papel crucial en la mejora de la eficiencia y seguridad en entornos industriales mediante la aplicación de estándares de interoperabilidad y la utilización de herramientas avanzadas para la monitorización del rendimiento. La capacidad de WoT-IL para mantener una alta precisión y baja latencia, junto con una infraestructura robusta, subraya su efectividad en la facilitación de procesos y la preparación para la transformación digital.

#### H2: Integración del Trabajador

La integración de los trabajadores en los procesos de transformación digital ha sido notablemente facilitada por los estándares de interoperabilidad utilizados en WoT-IL. La sección 4.3 *Diseño y Desarrollo de WoT-IL* detalla cómo este componente no solo mejora la conexión entre dispositivos y sistemas, sino que también optimiza la accesibilidad y usabilidad de las tecnologías avanzadas para los trabajadores. Los estándares de interoperabilidad de WoT-IL simplifican las interfaces y automatizan tareas repetitivas, permitiendo a los trabajadores enfocarse en actividades de mayor valor añadido. WoT-IL permite una integración fluida de dispositivos y sistemas al emplear estándares abiertos como los de la Web Semántica, que promueven la interoperabilidad entre tecnologías diversas. Esta integración mejora la accesibilidad a las tecnologías avanzadas al reducir la complejidad de

los sistemas y simplificar las interfaces de usuario. La automatización de tareas repetitivas es una ventaja clave, ya que libera a los trabajadores de labores rutinarias y les permite concentrarse en tareas que aportan más valor, como se indica en la literatura sobre el impacto de la automatización en la productividad laboral.

Los resultados indican que la adopción de WoT-IL no solo mejora la productividad de los trabajadores, sino que también aumenta su adaptabilidad a nuevas tecnologías, un factor clave para el éxito en la Industria 5.0. En la sección 3.4, se destaca cómo la formación y el entrenamiento continuo, facilitados por herramientas de interoperabilidad como WoT-IL, apoyan a los trabajadores en la familiarización con nuevas tecnologías. Los estudios sugieren que el entrenamiento adecuado es fundamental para una transición efectiva hacia el uso de tecnologías avanzadas, ya que permite a los empleados adaptarse a los cambios digitales con mayor eficacia. La interoperabilidad facilita esta formación al proporcionar un marco coherente que reduce la curva de aprendizaje y mejora la competencia tecnológica de los trabajadores.

Posteriormente, en la sección 5.2.1, se profundiza en cómo la integración de tecnologías en el entorno laboral, facilitada por WoT-IL, permite a los trabajadores centrarse en tareas de mayor valor añadido. La reducción de la carga de trabajo repetitiva y la mejora en la interacción con tecnologías avanzadas contribuyen a una mayor satisfacción laboral, un aspecto respaldado por estudios sobre la relación entre la automatización y la satisfacción en el trabajo. Al reducir la monotonía y aumentar el enfoque en actividades que requieren habilidades más complejas, los trabajadores experimentan un incremento en la satisfacción laboral y en el rendimiento general.

En conclusión, la implementación de estándares de interoperabilidad en WoT-IL ha demostrado ser un factor clave en la integración de trabajadores en la transformación digital. La mejora en la accesibilidad, usabilidad y la reducción de tareas repetitivas no solo incrementa la productividad, sino que también facilita la adaptación a nuevas tecnologías y mejora la satisfacción laboral, alineándose con los principios de la Industria 5.0.

### **H3: Experiencia Laboral Mejorada**

La colaboración mejorada entre humanos y máquinas, facilitada por WoT-IL, ha transformado positivamente la experiencia laboral. En el Capítulo 1, se discute cómo la Industria 5.0 se centra en una colaboración más estrecha entre humanos y tecnologías, destacando la importancia de un enfoque centrado en el humano. WoT-IL, al proporcionar una interoperabilidad semántica avanzada, permite una interacción más fluida y significativa entre los trabajadores y las máquinas, lo que no solo aumenta la eficiencia sino también la satisfacción laboral.

En la sección 5.2.1, se detalla cómo la implementación de WoT-IL en escenarios industriales reales ha permitido que los trabajadores se enfoquen en sus tareas principales sin tener que asumir tareas adicionales. Esto ha sido crucial para aliviar el estrés y mejorar la satisfacción laboral, ya que los trabajadores no necesitan programar tareas adicionales fuera de sus responsabilidades principales. Este enfoque ha sido particularmente efectivo para proporcionar a los ingenieros de producción una visión clara de cómo se utilizan los recursos automatizados y humanos durante la producción, mejorando la eficiencia y la toma de decisiones.

Además, WoT-IL ha demostrado su capacidad para facilitar la interoperabilidad entre múltiples sistemas y dispositivos, lo que ha resultado en un entorno de trabajo más

intuitivo y accesible para los trabajadores. Esto se ha traducido en una mayor motivación y participación activa de los empleados en los procesos digitales, reduciendo la curva de aprendizaje y fomentando una colaboración más estrecha entre humanos y máquinas.

En conjunto, estos avances no solo han enriquecido la experiencia laboral al proporcionar herramientas más adaptativas y personalizadas, sino que también han contribuido a crear un entorno industrial más seguro y eficiente. La tecnología ha sido un facilitador clave para esta transición, mostrando cómo la interoperabilidad y la colaboración humano-máquina pueden ser pilares fundamentales en la evolución hacia la Industria 5.0, que pone un énfasis particular en la personalización y el bienestar de los trabajadores.

Esta evidencia subraya la importancia de la interoperabilidad semántica en la mejora de la experiencia laboral, promoviendo un entorno de trabajo más inclusivo y adaptativo, donde la tecnología se convierte en un aliado para el desarrollo humano y profesional.

#### **H4: Superación de la Fragmentación**

WoT-IL ha demostrado ser una solución efectiva para superar la fragmentación en los entornos industriales, facilitando la integración y comunicación entre diversas tecnologías y sistemas heterogéneos. Las pruebas descritas en el Capítulo 5, específicamente en las secciones 5.1.4 y 5.1.5, subrayan cómo WoT-IL proporciona una solución cohesiva para la interoperabilidad en plataformas como FIWARE y el entorno WoT.

En la sección 5.1.4, se realiza un análisis comparativo de rendimiento entre WoT-IL y el agente F4I OPC UA. Este análisis revela que WoT-IL no solo maneja eficientemente las velocidades de transmisión de datos, sino que también presenta una utilización más eficiente de los recursos, como la CPU y la memoria. Este rendimiento superior subraya la capacidad de WoT-IL para manejar la integración de datos de múltiples sistemas sin degradar el rendimiento, un factor crucial para superar la fragmentación en entornos industriales complejos.

La sección 5.1.5 aborda el análisis de rendimiento de WoT-IL en el entorno Web of Things, donde se simularon diferentes escenarios de carga de datos. Los resultados demostraron que WoT-IL puede manejar eficientemente entornos con alta demanda de intercambio de datos, como se evidenció en la gestión de datos de alta frecuencia y variabilidad. La capacidad de WoT-IL para mantener una transmisión de datos estable y controlada, incluso bajo condiciones de alta demanda, destaca su adaptabilidad y robustez. Esta estabilidad en el manejo de datos es crucial para mantener una interoperabilidad fluida y efectiva en entornos industriales que requieren una coordinación constante entre múltiples dispositivos y sistemas.

Estas capacidades de WoT-IL no solo mejoran la interoperabilidad de la plataforma FIWARE y otros entornos tecnológicos, sino que también facilitan una integración más profunda y eficiente de los datos en tiempo real. Esto, a su vez, permite a las organizaciones industriales optimizar sus procesos y tomar decisiones basadas en datos precisos y actualizados, destacando la relevancia de WoT-IL en el avance hacia una industria más interconectada y eficiente. Los resultados, respaldados por pruebas rigurosas, demuestran que WoT-IL no solo supera las limitaciones de los sistemas fragmentados, sino que también establece un nuevo estándar en la interoperabilidad semántica. WoT-IL facilita la transformación digital de la industria hacia un modelo más integrado y eficiente. Según un análisis de Marr (2018), la interoperabilidad semántica es clave para la transformación digital, ya que permite una integración más profunda de datos y una coordinación más efectiva entre

dispositivos y sistemas.

En conclusión, WoT-IL ha mostrado ser una solución robusta y eficiente para superar la fragmentación en entornos industriales, ofreciendo una integración más efectiva y facilitando una coordinación constante entre múltiples sistemas y dispositivos. Esto resalta su relevancia en el avance hacia una industria más interconectada y eficiente.

### 6.1.2 Implicaciones de la Investigación

La efectividad de WoT-IL en superar la fragmentación en la industria ha quedado demostrada mediante su implementación en escenarios industriales reales. Dentro del marco del proyecto SHOP4CF, WoT-IL ha facilitado una integración más profunda del trabajador en los procesos digitales, liberándolo de tareas repetitivas y contribuyendo así a crear un entorno laboral más seguro y eficiente.

WoT-IL ha mostrado una notable capacidad para integrar tecnologías dispares y mejorar la interacción humano-máquina. Esta integración es crucial para liberar a los trabajadores de tareas repetitivas, permitiéndoles centrarse en tareas de mayor valor añadido. Según un estudio de Brynjolfsson y McAfee (Brynjolfsson et al., 2014), la automatización de tareas rutinarias puede mejorar la eficiencia operativa y proporcionar a los trabajadores más tiempo para realizar tareas creativas y de resolución de problemas. Al liberar a los empleados de estas tareas repetitivas, WoT-IL contribuye a un entorno laboral más seguro y eficiente, en línea con las mejores prácticas en la industria.

Estas soluciones tienen implicaciones significativas para el futuro de la industria. La adopción de tecnologías centradas en la interoperabilidad semántica, como WoT-IL, permitirá a las empresas enfrentar mejor los desafíos de un entorno industrial cada vez más automatizado y globalizado. En el contexto de la Industria 5.0, donde la integración de la tecnología y el bienestar del trabajador son esenciales, WoT-IL proporciona una base sólida para enfrentar estos desafíos. La capacidad de conectar dispositivos y sistemas diversos es fundamental para mejorar la flexibilidad y la productividad en la Industria 5.0. WoT-IL, al mejorar la interoperabilidad y la interacción humano-máquina, se alinea perfectamente con esta visión, facilitando una transición hacia entornos laborales más adaptativos y orientados al bienestar del trabajador. A largo plazo, el enfoque de WoT-IL hacia la interoperabilidad centrada en el ser humano puede servir como un modelo para desarrollar soluciones que no solo respondan a las demandas tecnológicas, sino que también promuevan una industria más inclusiva y resiliente. La investigación en la tecnología centrada en el ser humano muestra que la integración de soluciones tecnológicas con una consideración cuidadosa de la experiencia del usuario puede resultar en entornos laborales más inclusivos y efectivos (W. Bauer et al., 2019, Venkatesh et al., 2003).

El enfoque de WoT-IL puede preparar a las organizaciones para enfrentar los retos de una industria en constante evolución. La capacidad de WoT-IL para mejorar la interoperabilidad, aumentar la eficiencia operativa y promover un entorno laboral seguro y adaptable es un indicador clave de su valor en la transformación digital de la industria. Como destacan estudios recientes sobre la evolución de la tecnología industrial, la capacidad para integrar diversas tecnologías de manera efectiva y centrarse en el bienestar del trabajador es crucial para el éxito a largo plazo en un entorno industrial dinámico y en constante cambio. Las lecciones aprendidas de la implementación de WoT-IL ofrecen un modelo para futuras innovaciones, donde la tecnología y la experiencia de los trabajadores se entrelacen de

manera sinérgica.

## 6.2 Conclusiones

Al concluir esta tesis doctoral, se llega a un punto crucial de reflexión sobre las contribuciones significativas que este trabajo de investigación ha aportado al campo de la transformación digital industrial, con énfasis particular en la interoperabilidad centrada en el ser humano. A través del desarrollo, implementación y validación del componente WoT-IL, se ha profundizado en la sinergia entre humanos y máquinas, destacando la viabilidad y el potencial de las tecnologías de la Web Semántica para innovar los procesos industriales. En esta sección de conclusiones, se busca resumir y reflexionar sobre cómo los hallazgos responden a las preguntas planteadas inicialmente, marcando no solo la culminación de un proceso investigativo sino también el inicio de nuevas direcciones en este campo.

La discusión presentada en la sección anterior ha permitido considerar tanto el impacto directo de la investigación en la industria, como las implicaciones más amplias para el futuro de la colaboración humano-máquina en contextos industriales. Enfocándose en cada una de las preguntas de investigación, se proporcionarán respuestas basadas en los resultados obtenidos y se reflexionará sobre el trayecto investigativo recorrido. Este enfoque no solo demostrará la relevancia y aplicabilidad del trabajo, sino que también establecerá una base para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos en este ámbito esencial.

### 6.2.1 Respuestas a las Preguntas de Investigación

#### **PI.1 ¿Cómo pueden los estándares de interoperabilidad, complementados con tecnologías de la Web Semántica, mejorar la eficiencia y la seguridad en los procesos industriales?**

La implementación del componente WoT-IL ha evidenciado cómo los estándares de interoperabilidad, en sinergia con tecnologías de la Web Semántica, son fundamentales para mejorar la eficiencia y la seguridad en la industria. Los estándares de interoperabilidad permiten que sistemas y dispositivos heterogéneos se comuniquen de manera coherente y uniforme, lo que se traduce en una integración más fluida entre diferentes tecnologías y plataformas. La Web Semántica, mediante el uso de ontologías y vocabularios estandarizados, facilita la interpretación y el intercambio de datos entre sistemas diversos, proporcionando una estructura común que permite a los sistemas comprender y procesar datos de manera consistente. Esto reduce la necesidad de conversiones complejas y disminuye los errores en la interpretación de datos. La integración eficiente de sistemas mejora los procesos de automatización al permitir una coordinación más efectiva entre diferentes componentes del sistema, como se ha demostrado en WoT-IL, donde la interoperabilidad ha contribuido a reducir los tiempos de inactividad al asegurar que los datos fluyan sin problemas entre sistemas.

En la sección 5.2.1 del estudio, se evaluó cómo WoT-IL mejora la interacción entre humanos y máquinas. La estandarización y la interoperabilidad facilitan una comunicación más clara y eficiente, lo que reduce la posibilidad de errores y accidentes en el entorno laboral. La tecnología centrada en el ser humano ha demostrado que una mejor interacción entre humanos y sistemas puede reducir los riesgos laborales y mejorar la seguridad en el lugar

de trabajo (W. Bauer et al., 2019).

Finalmente, la utilización de tecnologías de la Web Semántica y estándares de interoperabilidad permite un monitoreo más eficaz de los sistemas industriales. Las herramientas de monitorización como Prometheus y cAdvisor, integradas con WoT-IL, han permitido la identificación temprana de posibles amenazas y cuellos de botella, lo que facilita una respuesta rápida y efectiva para proteger los sistemas y asegurar la continuidad operativa. Esto se ha demostrado con los resultados obtenidos en la sección 5.1.4, donde se analizó el rendimiento del sistema en términos de utilización de recursos, y en la sección 5.2.1, donde se evaluó la mejora en la interacción humano-máquina y el impacto en la seguridad laboral.

### **PI.2 ¿Cómo estos estándares de interoperabilidad pueden facilitar la integración del trabajador en los procesos de transformación digital?**

Los estándares de interoperabilidad, tales como FIWARE y WoT, facilitan significativamente la integración de los trabajadores en la transformación digital al generar entornos laborales intuitivos y accesibles. Estos marcos regulan las comunicaciones entre dispositivos y sistemas, lo que permite el desarrollo de interfaces de usuario amigables y sistemas de apoyo que los empleados pueden utilizar con facilidad. Como resultado, se minimiza la curva de aprendizaje y se fomenta una participación más activa en los procesos digitales, como lo han demostrado los resultados obtenidos por los desarrolladores en el apartado 5.2.1, donde se destaca cómo la simplificación de las interfaces y la automatización de tareas ha mejorado la interacción de los trabajadores con las tecnologías avanzadas y ha facilitado su adaptación a los nuevos entornos digitales.

### **PI.3 ¿Cuál es el impacto de la colaboración humano-máquina en la experiencia laboral y en la creación de un entorno industrial más eficiente y seguro?**

La colaboración entre humanos y máquinas ha evolucionado de manera significativa, promoviendo no solo la eficiencia y seguridad en los ambientes de trabajo, sino también enriqueciendo la experiencia laboral. Esta sinergia, catalizada por la Industria 5.0 y ejemplificada en el proyecto SHOP4CF, fomenta un ambiente de trabajo más satisfactorio y adaptativo, resaltando un compromiso con la sostenibilidad y el bienestar humano. Si bien se podría argumentar que la usabilidad de las soluciones tecnológicas es un reto en entornos industriales complejos, los resultados presentados en la sección 5.2.1 muestran que WoT-IL ha logrado superar esta barrera. La implementación de interfaces simplificadas y herramientas de apoyo, junto con la retroalimentación constante de los usuarios, ha permitido mejorar notablemente la usabilidad, facilitando la adopción de estas soluciones y mejorando la experiencia laboral sin sacrificar eficiencia ni seguridad.

### **PI.4 ¿Cómo se puede desarrollar y aplicar un componente adaptable para superar la fragmentación de la interoperabilidad semántica en los procesos de transformación digital?**

WoT-IL representa un avance crucial en la superación de la fragmentación de la interoperabilidad semántica, proporcionando una solución cohesiva que facilita la comunicación y el intercambio de datos entre sistemas heterogéneos. Este componente no solo simplifica la implementación de soluciones inteligentes, sino que también promueve un entorno de producción interconectado y centrado en el ser humano, potenciando así la personalización y adaptabilidad en los procesos industriales, como se ha demostrado en las pruebas realizadas en entornos reales descritas en la sección 5.1.5. Los resultados obtenidos en estas

pruebas validan la capacidad de WoT-IL para operar en escenarios industriales complejos, manteniendo su eficiencia y adaptabilidad, lo que ha permitido superar la fragmentación de datos entre múltiples sistemas y facilitar la interconexión entre tecnologías diversas.

El componente WoT-IL se desarrolló con un enfoque modular y flexible, diseñado para superar la fragmentación de la interoperabilidad semántica. Este desarrollo incluyó la definición de requisitos claros, la selección de estándares y la creación de una arquitectura que facilita la integración de datos entre diferentes sistemas, como se detalla en la sección 4.3.

Las pruebas realizadas en entornos industriales reales han corroborado la efectividad de WoT-IL para superar la fragmentación semántica. En la sección 5.1.5, se detalla cómo WoT-IL fue evaluado en escenarios de alta demanda de datos, demostrando su capacidad para manejar datos de alta frecuencia y variabilidad con alta eficiencia. Estas pruebas confirmaron que WoT-IL mantiene su rendimiento incluso en entornos industriales complejos, validando su capacidad para integrar y comunicar datos entre sistemas diversos.

WoT-IL ha facilitado la integración y comunicación entre diversas tecnologías y sistemas heterogéneos, superando las barreras de fragmentación semántica. Como se muestra en el análisis comparativo de rendimiento entre WoT-IL y el agente F4I OPC UA en la sección 5.1.4, WoT-IL no solo gestiona eficientemente las velocidades de transmisión de datos, sino que también optimiza el uso de recursos como la CPU y la memoria. Esto ha permitido una comunicación fluida y coherente entre sistemas dispares, promoviendo una mayor interconexión en el entorno industrial.

La aplicación de WoT-IL ha resultado en una mejora significativa de la eficiencia y seguridad en los procesos industriales. La capacidad de WoT-IL para mantener una transmisión de datos estable, incluso bajo condiciones de alta demanda, contribuye a una gestión más efectiva de los recursos y a una mayor seguridad operativa. Los resultados obtenidos en las pruebas de rendimiento respaldan esta afirmación, destacando cómo WoT-IL ayuda a optimizar los procesos y reducir riesgos en el entorno industrial, tal como se evidenció en la sección 5.1.5.

Podemos concluir, de este modo, que WoT-IL ha demostrado su capacidad para adaptarse a diferentes contextos y necesidades, facilitando la personalización de las soluciones tecnológicas. La implementación de interfaces simplificadas y herramientas de apoyo ha mejorado la interacción de los trabajadores con las tecnologías avanzadas, haciendo que el entorno de trabajo sea más accesible y eficiente. Esta adaptabilidad ha sido clave para superar la fragmentación semántica y facilitar la integración de datos en tiempo real.

## 6.2.2 Reflexiones Finales

Este trabajo de investigación ha proporcionado una visión exhaustiva sobre la importancia de integrar estándares de interoperabilidad, en conjunto con herramientas de la Web Semántica, en los procesos industriales, estableciendo una base sólida para su adopción en la práctica industrial diaria. La investigación delineó cómo la interoperabilidad puede servir de catalizador para una transformación digital centrada en el ser humano, abriendo caminos para futuros desarrollos y aplicaciones tecnológicas en este campo fundamental.

A lo largo de este estudio, se demostró la potencialidad de estos estándares para mejorar la sinergia entre humanos y máquinas, preparando el terreno para avanzar hacia la Industria

5.0. Sin embargo, es esencial reconocer las limitaciones que enfrentó la investigación, incluyendo la variabilidad en la implementación tecnológica en diferentes entornos industriales y las limitaciones inherentes a los estudios de caso específicos, lo que podría influir en la generalización de los resultados. Además, la adopción de nuevas tecnologías enfrenta barreras culturales y organizativas que pueden ralentizar o distorsionar los beneficios percibidos de la interoperabilidad.

Mirando hacia el futuro, es crucial que las investigaciones subsiguientes aborden estos desafíos mediante el diseño de estudios más amplios y diversificados que incorporen una gama más extensa de variables industriales y humanas. También será importante explorar más profundamente cómo las políticas y los marcos regulatorios pueden adaptarse para facilitar una transición más suave hacia entornos digitales altamente interconectados y centrados en el humano.

Finalmente, este trabajo subraya la urgencia de continuar explorando las fronteras de la interoperabilidad semántica para enriquecer no solo la teoría y la práctica en la transformación digital industrial, sino también para mejorar la calidad de vida de los trabajadores y fomentar un ambiente de trabajo más seguro y satisfactorio. Estos esfuerzos marcarán el comienzo de una era de innovaciones que son tanto tecnológicamente avanzadas como profundamente integradas en la experiencia humana, contribuyendo a un futuro industrial más sostenible y centrado en el ser humano.

# Referencias

- Abril-Jimenez, P., Carvajal, D., Buhid, E., Gaeta, E., & Cabrera-Umpierrez, M. F. (2022, febrero). *D5.6 Evaluation of early pilot prototypes* (P. Abril-Jimenez, Ed.; inf. téc.) (Grant Agreement No. 873087). SHOP4CF Consortium.
- Abril-Jimenez, P., Carvajal, D., Buhid, E., Gaeta, E., & Cabrera-Umpierrez, M. F. (2023, octubre). *D5.7 Evaluation Including Final Pilots Prototypes and FSTP Experiments* (P. Abril-Jimenez, Ed.; inf. téc.) (Grant Agreement No. 873087). SHOP4CF Consortium.
- Abril-Jiménez, P., Carvajal-Flores, D., Buhid, E., & Cabrera-Umpierrez, M. F. (2024). Enhancing worker-centred digitalisation in industrial environments: A KPI evaluation methodology. *Heliyon*, *10*(4), e26638. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26638>
- Aguzzi, C., Gigli, L., Sciallo, L., Trotta, A., Zonzini, F., Marchi, L. D., Felice, M. D., Marzani, A., & Cinotti, T. S. (2021). Modron: A scalable and interoperable web of things platform for structural health monitoring. *2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, 1-7.
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications [ID: 1]. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- Alliance, E. D. S. (2021). Digital Skills for SMEs: Challenges and Opportunities.
- Alonso, Á., Pozo, A., Cantera, J. M., la Vega, F. D., & Hierro, J. J. (2018). Industrial Data Space Architecture Implementation Using FIWARE. *Sensors*, *18*(7), 2226. <https://doi.org/10.3390/s18072226>
- Alves, J., Lima, T. M., & Gaspar, P. D. (2023). Is Industry 5.0 a Human-Centred Approach? A Systematic Review. *Processes*, *11*(1). <https://doi.org/10.3390/pr11010193>
- Aly, M., Khomh, F., Guéhéneuc, Y.-G., Washizaki, H., & Yacout, S. (2018). Is Fragmentation a Threat to the Success of the Internet of Things? *IEEE Internet of Things Journal*, *6*(1), 472-487.
- Anees, T., Habib, Q., Al-Shamayleh, A. S., Khalil, W., Obaidat, M. A., & Akhunzada, A. (2023). The integration of WoT and edge computing: Issues and challenges. *Sustainability*, *15*(7), 5983.
- Antonios, P., Konstantinos, K., & Christos, G. (2023). A systematic review on semantic interoperability in the IoE-enabled smart cities. *Internet of Things*, 100754.
- Apache Software Foundation. (2024). Apache JMeter [Accessed: 2024-09-12].
- Arntz, M., Gregory, T., & Zierahn, U. (2016). *The Risk of Automation for Jobs in OECD Countries: A Comparative Analysis* (inf. téc. N.º 189). OECD Publishing. Paris. <https://doi.org/10.1787/5j1z9h56dvq7-en>
- Aromaa, S., Heikkilä, P., & Kuula, T. (2020, diciembre). *D2.3 Design and Evaluation Framework for User Studies 1* (S. Aromaa, Ed.; inf. téc. N.º Grant Agreement

- No. 873087) (Public Dissemination Level). Smart Human Oriented Platform for Connected Factories (SHOP4CF).
- Ashton, K. (2009). That ‘internet of things’ thing. *RFID journal*, 22(7), 97-114.
- Atieh, A. M., Cooke, K. O., & Osiyevskyy, O. (2023). The role of intelligent manufacturing systems in the implementation of Industry 4.0 by small and medium enterprises in developing countries [https://doi.org/10.1002/eng2.12578; 07]. *Engineering Reports*, 5(3), e12578. <https://doi.org/10.1002/eng2.12578>
- Bai, C., Quayson, M., & Sarkis, J. (2021). COVID-19 pandemic digitization lessons for sustainable development of micro-and small- enterprises [ID: 312218]. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1989-2001. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.04.035>
- Barata, J., & Kayser, I. (2023). Industry 5.0 – Past, Present, and Near Future [ID: 280203]. *Procedia Computer Science*, 219, 778-788. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.351>
- Barleta, E., Pérez, G., & Sánchez, R. (2020). La revolución industrial 4.0 y el advenimiento de una logística 4.0.
- Bauer, K. (2004). KPIs-The metrics that drive performance management. *Information Management*, 14(9), 63.
- Bauer, W., Schuler, S., Hornung, T., & Decker, J. (2019). Development of a procedure model for human-centered industry 4.0 projects. *Procedia manufacturing*, 39, 877-885.
- Belhadi, A., Kamble, S., Gunasekaran, A., & Mani, V. (2022). Analyzing the mediating role of organizational ambidexterity and digital business transformation on industry 4.0 capabilities and sustainable supply chain performance [14]. *Supply Chain Management: An International Journal*, 27(6), 696-711. <https://doi.org/10.1108/SCM-04-2021-0152>
- Belitski, M., Guenther, C., Kritikos, A. S., & Thurik, R. (2022). Economic effects of the COVID-19 pandemic on entrepreneurship and small businesses [ID: Belitski2022]. *Small Business Economics*, 58(2), 593-609. <https://doi.org/10.1007/s11187-021-00544-y>
- Ben Youssef, A., & Mejri, I. (2023). Linking Digital Technologies to Sustainability through Industry 5.0: A bibliometric Analysis. *Sustainability*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/su15097465>
- Bergmann, H., Mosiman, C., Saha, A., Haile, S., Livingood, W., Bushby, S., Fierro, G., Bender, J., Poplawski, M., & Granderson, J. (2020). No title. *Semantic interoperability to enable smart, grid-interactive efficient buildings*.
- Bessen, J. (2019). Automation and jobs: When technology boosts employment. *Economic Policy*, 34(100), 589-626.
- Bessen, J., Goos, M., Salomons, A., & van den Berge, W. (2020). Automation: A guide for policymakers. *Economic Studies at Brookings Institution: Washington, DC, USA*.
- Bird, M. S. (2010). *Utilizing agile software development as an effective and efficient process to reduce development time and maintain quality software delivery*. Capella University.
- Blobel, B., & Oemig, F. (2015). The importance of architectures for interoperability. *pHealth*, 18-56.
- Brhel, M., Meth, H., Maedche, A., & Werder, K. (2015). Exploring principles of user-centered agile software development: A literature review. *Information and software technology*, 61, 163-181.

- Brougham, D., & Haar, J. (2018). Smart Technology, Artificial Intelligence, Robotics, and Algorithms (STARA): Employees' perceptions of our future workplace. *Journal of Management & Organization*, 24(2), 239-257. <https://doi.org/10.1017/jmo.2016.55>
- Brunnermeier, M., & Payne, J. (2022). Platforms, tokens and interoperability. *Unpublished Working Paper*.
- Brynjolfsson, E., McAfee, A., & Spence, M. (2014). New world order: labor, capital, and ideas in the power law economy. *Foreign Affairs*, 93(4), 44-53.
- Burns, T., Cosgrove, J., & Doyle, F. (2019). A Review of Interoperability Standards for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 38, 646-653.
- Cappellin, R., Ciciotti, E., Marelli, E., & Garofoli, G. (2020). A new European industrial strategy and the European recovery program after the COVID-19 crisis. *A new European industrial strategy and the European recovery program after the Covid-19 crisis*, 265-284.
- Carayannis, E. G., & Morawska-Jancelewicz, J. (2022). The Futures of Europe: Society 5.0 and Industry 5.0 as Driving Forces of Future Universities [ID: Carayannis2022]. *Journal of the Knowledge Economy*, 13(4), 3445-3471. <https://doi.org/10.1007/s13132-021-00854-2>
- Carvajal-Flores, D. F., Abril-Jiménez, P., Buhid, E., Fico, G., & Cabrera Umpiérrez, M. F. (2024). Enhancing Industrial Digitalisation through an Adaptable Component for Bridging Semantic Interoperability Gaps. *Applied Sciences*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/app14062309>
- CEDEFOP. (2023). Skills forecast [Accessed: 2024-02-10].
- Charpenay, V., Käfer, T., & Harth, A. (2021). A unifying framework for agency in hypermedia environments. *International Workshop on Engineering Multi-Agent Systems*, 42-61.
- Chen, D., & Doumeingts, G. (2003). European initiatives to develop interoperability of enterprise applications—basic concepts, framework and roadmap. *Annual reviews in control*, 27(2), 153-162.
- Choi, W. G., Kim, S., Kim, J., Song, M. .-, & Lee, S. .-. (2022). Real-Time Data Processing Framework for Things with time-series and spatial features [ID: 1]. - 2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 1694-1696. <https://doi.org/10.1109/ICTC55196.2022.9952888>
- Ciortea, A., Mayer, S., Boissier, O., & Gandon, F. (2019). Exploiting interaction affordances: on engineering autonomous systems for the web of things. *Second W3C Workshop on the Web of Things The Open Web to Challenge IoT Fragmentation*.
- Comission, E. (2022). The future of work.
- Commission, E., for Research, D.-G., & Innovation. (2020a). *Industry 5.0 – Human-centric, sustainable and resilient*. Publications Office. <https://doi.org/10.2777/073781>
- Commission, E., for Research, D.-G., & Innovation. (2020b). *Industry 5.0 – Human-centric, sustainable and resilient*. Publications Office. <https://doi.org/10.2777/073781>
- Commission, E., for Research, D.-G., Innovation, Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). *Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi/10.2777/308407>
- Conde, J., Muñoz-Arcentales, A., Alonso, Á., López-Pernas, S., & Salvachúa, J. (2022). Modeling Digital Twin Data and Architecture: A Building Guide With FIWARE as Enabling Technology. *IEEE Internet Computing*, 26(3), 7-14. <https://doi.org/10.1109/MIC.2021.3056923>

- Conti, M., Donadel, D., & Turrin, F. (2021). A Survey on Industrial Control System Testbeds and Datasets for Security Research. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(4), 2248-2294. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3094360>
- Cucuzza, M. (2023, marzo). *Lean Construction 4.0: a new paradigm to support the adoption of Industrialized Building Systems and the digital transition of SMEs* [Tesis doctoral].
- da Rocha, H., Espirito-Santo, A., & Abrishambaf, R. (2020). Semantic interoperability in the industry 4.0 using the IEEE 1451 standard. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 5243-5248.
- Danneels, L., & Viaene, S. (2022). Identifying Digital Transformation Paradoxes [ID: Danneels2022]. *Business & Information Systems Engineering*, 64(4), 483-500. <https://doi.org/10.1007/s12599-021-00735-7>
- Daud, I., Nurjannahe, D., Mohyi, A., Ambarwati, T., Cahyono, Y., Haryoko, A. E., Handoko, A. L., Putra, R. S., Wijoyo, H., & Ariyanto, A. (2022). The effect of digital marketing, digital finance and digital payment on finance performance of indonesian smes. *International Journal of Data and Network Science*, 6, 37-44.
- Davenport, T. H. (2018, octubre). *The AI Advantage: How to Put the Artificial Intelligence Revolution to Work* (Primera Edición). MIT Press.
- D’Cruz, P., Du, S., Noronha, E., Parboteeah, K. P., Trittin-Ulbrich, H., & Whelan, G. (2022). Technology, megatrends and work: Thoughts on the future of business ethics. *Journal of Business Ethics*, 180(3), 879-902.
- de Bem Machado, A., Secinaro, S., Calandra, D., & Lanzalonga, F. (2022). Knowledge management and digital transformation for Industry 4.0: a structured literature review [doi: 10.1080/14778238.2021.2015261]. *Knowledge Management Research & Practice*, 20(2), 320-338. <https://doi.org/10.1080/14778238.2021.2015261>
- Deganis, I., Tagashira, M., & Yang, W. (2021). Digitally enabled new forms of work and policy implications for labour regulation frameworks and social protection systems.
- Delaram, J., & Valilai, O. F. (2017). A novel solution for manufacturing interoperability fulfillment using interoperability service providers. *Procedia Cirp*, 63, 774-779.
- Denning, S. (2023). Recognizing and outmaneuvering the resistance to digital transformation. *Strategy & Leadership*, 51(2), 10-16. <https://doi.org/10.1108/SL-01-2023-0002>
- Desai, P., Sheth, A., & Anantharam, P. (2015). Semantic gateway as a service architecture for iot interoperability. *2015 IEEE International Conference on Mobile Services*, 313-319.
- Dodd, T., Cheong, C. S., Hoffmann, A., & Zurbruegg, R. (2024). Toward sustainable auto-mobility: Insights from a stewardship literature review of the industry [[Correction added on 27 March 2024, after first online publication: The author name Ralf-Yves Zurbrugg has been corrected to Ralf Zurbruegg in this version.] [Correction added on 13 June 2024, after first online publication: The name ‘Seng’ has been added to the 2nd author name, ‘Chee Seng Cheong’ in this version.]]. *Business Strategy and the Environment*. <https://doi.org/10.1002/bse.3736>
- Dolin, R. H., Alschuler, L., Beebe, C., Biron, P. V., Boyer, S. L., Essin, D., Kimber, E., Lincoln, T., & Mattison, J. E. (2001). The HL7 clinical document architecture. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 8(6), 552-569.
- Elbeltagi, I., Sharji, Y., Hardekar, G., & Elsetouhi, A. (2013). The Role of the Owner-Manager in SMEs’ Adoption of Information and Communication Technology in the United Arab Emirates. *Journal of Global Information Management*, 21, 23-50. <https://doi.org/10.4018/jgim.2013040102>

- Ellingrud, K., Gupta, R., & Salguero, J. (2020, agosto). Building the vital skills for the future of work in operations.
- Engineering Research and Development. (2024). IoTAgent-OPCUA: An IoT Agent for OPC UA Protocol [Accessed: 2024-09-12].
- European Commission. (2021, enero). Industry 5.0 - Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry [Accessed: 2023-09-28].
- Fachrunnisa, O., Adhiatma, A., Lukman, N., & Majid, M. N. A. (2020). Towards SMEs' digital transformation: The role of agile leadership and strategic flexibility. *Journal of Small Business Strategy*, 30(3), 65-85.
- Faridi, M. R., & Malik, A. (2020). Digital transformation in supply chain, challenges and opportunities in SMEs: a case study of Al-Rumman Pharma. *Emerald Emerging Markets Case Studies*, 10(1), 1-16.
- Farooq, M. S., Riaz, S., & Alvi, A. (2023). Web of Things and Trends in Agriculture: A Systematic Literature Review. *arXiv e-prints*, arXiv: 2306.09079.
- Freij, M., Dullabh, P., Lewis, S., Smith, S. R., Hovey, L., & Dhopeswarkar, R. (2019). Incorporating social determinants of health in electronic health records: qualitative study of current practices among top vendors. *JMIR medical informatics*, 7(2), e13849.
- Fukuyama, M. (2018). Society 5.0: Aiming for a new human-centered society. *Japan Spotlight*, 27(5), 47-50.
- Galunic, C. (2020). *Overcoming Resistance to Digital Change* [INSEAD Knowledge]. <https://knowledge.insead.edu/leadership-organisations/overcoming-resistance-to-digital-change-13746>
- García-Gámez, M. (2021). 28 de abril, día mundial de la seguridad y salud en el trabajo. *Revista Española de Salud Pública*, 95.
- Gauret, F. (2023, junio). The European Year of Skills: Future proofing Europe's workforce.
- Geest, M. V., Tekinerdogan, B., & Catal, C. (2021). Design of a reference architecture for developing smart warehouses in industry 4.0. *Computers in Industry*, 124, 103343.
- Ghobakhloo, M., Mahdiraji, H. A., Iranmanesh, M., & Jafari-Sadeghi, V. (2024). From Industry 4.0 Digital Manufacturing to Industry 5.0 Digital Society: a Roadmap Toward Human-Centric, Sustainable, and Resilient Production. *Information Systems Frontiers*. <https://doi.org/10.1007/s10796-024-10476-z>
- Google. (2024). cAdvisor: Container Advisor [Accessed: 2024-09-12].
- Grafana Labs. (2024). Grafana: The open and composable observability and data visualization platform [Accessed: 2024-09-12].
- Grangel-González, I., Baptista, P., Halilaj, L., Lohmann, S., Vidal, M.-E., Mader, C., & Auer, S. (2017). The industry 4.0 standards landscape from a semantic integration perspective. *2017 22nd IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA)*, 1-8.
- Guinard, D., Trifa, V., Mattern, F., & Wilde, E. (2011). From the Internet of Things to the Web of Things: Resource-oriented Architecture and Best Practices. En D. Uckelmann, M. Harrison & F. Michahelles (Eds.). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-19157-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19157-2_5)
- Haddara, M., Gøthesen, S., & Langseth, M. (2022). Challenges of Cloud-ERP Adoptions in SMEs [ID: 280203]. *Procedia Computer Science*, 196, 973-981. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.099>
- Hafidi, M. M., Djezzar, M., Hemam, M., Amara, F. Z., & Maimour, M. (2023). Semantic web and machine learning techniques addressing semantic interoperability in Industry

- 4.0. *International Journal of Web Information Systems*, 19(3/4), 157-172. <https://doi.org/10.1108/IJWIS-03-2023-0046>
- Haleem, A., Javaid, M., & Singh, R. P. (2024). Perspective of leadership 4.0 in the era of fourth industrial revolution: A comprehensive view. *Journal of Industrial Safety*, 1(1), 100006. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jinse.2024.100006>
- Hankel, M., & Rexroth, B. (2015). The reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0). *Zvei*, 2(2), 4-9.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*, 3928-3937.
- Hibbert, L. (2020, marzo). Industry 5.0 Brings Humans Back Into the Loop.
- Hildebrandt, J., Kluge, J., & Ziefle, M. (2019). Work in progress: barriers and concerns of elderly workers towards the digital transformation of work. *Human Aspects of IT for the Aged Population. Design for the Elderly and Technology Acceptance: 5th International Conference, ITAP 2019, Held as Part of the 21st HCI International Conference, HCII 2019, Orlando, FL, USA, July 26-31, 2019, Proceedings, Part I 21*, 158-169.
- Hodapp, D., & Hanelt, A. (2022). Interoperability in the era of digital innovation: An information systems research agenda. *Journal of Information Technology*, 37(4), 407-427.
- Hoske, M. T. (2014). Remote device connectivity enables the industrial Internet of things. *Control Engineering*, 61(5), DE-2 (1).
- Huang, S., Wang, B., Li, X., Zheng, P., Mourtzis, D., & Wang, L. (2022). Industry 5.0 and Society 5.0—Comparison, complementation and co-evolution [ID: 277340]. *Journal of Manufacturing Systems*, 64, 424-428. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.07.010>
- Ibermática, S. A. (2023, febrero). ¿Qué es la INDUSTRIA 5.0? Objetivos, diferencias y pilares fundamentales de la nueva era industrial.
- Jafari, N., Azarian, M., & Yu, H. (2022). Moving from Industry 4.0 to Industry 5.0: What Are the Implications for Smart Logistics? *Logistics*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/logistics6020026>
- Jain, A., & Rani, R. (2020). *WoT-Enabled Smart Cities*. CRC Press.
- Jaloudi, S. (2019). Communication protocols of an industrial internet of things environment: A comparative study. *Future Internet*, 11(3), 66.
- Jun, Z., Simplot-Ryl, D., Bisdikian, C., & Mouftah, H. T. (2011). The internet of things. *IEEE Commun.Mag*, 49(11), 30-31.
- Kagermann, H., Helbig, J., Wahlster, W., & Hellinger, A. (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry ; Final Report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion.
- Kalsoom, T., Ahmed, S., Rafi-ul-Shan, P. M., Azmat, M., Akhtar, P., Pervez, Z., Imran, M. A., & Ur-Rehman, M. (2021). Impact of IoT on Manufacturing Industry 4.0: A New Triangular Systematic Review. *Sustainability*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/su132212506>
- Kane, G. C., Palmer, D., Phillips, A. N., Kiron, D., & Buckley, N. (2015). Strategy, not technology, drives digital transformation. *MIT Sloan Management Review*.
- Keleko, A. T., Kamsu-Foguem, B., Ngouna, R. H., & Tongne, A. (2022). Artificial intelligence and real-time predictive maintenance in industry 4.0: a bibliometric analysis. *AI and Ethics*, 2(4), 553-577.

- Khan, W. Z., Rehman, M. H., Zangoti, H. M., Afzal, M. K., Armi, N., & Salah, K. (2020). Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers & Electrical Engineering*, *81*, 106522.
- Khattoon, P. S., & Ahmed, M. (2022). Importance of semantic interoperability in smart agriculture systems. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, *33*(5), e4448.
- Kiel, D., Müller, J. M., Arnold, C., & Voigt, K.-I. (2017). Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0. *International journal of innovation management*, *21*(08), 1740015.
- Kiewell, D., Robertson, M., Spüntrup, F. S., Niel, J. V., & Vedpathak. (2022, diciembre). Getting digital transformation right in resource-heavy industries.
- Kim, S., Lee, M., Yu, I., & Son, J. (2022). Key initiatives for digital transformation, green new deal and recovery after COVID-19 within the construction industry in Korea. *Sustainability*, *14*(14), 8726.
- Kleinrock, L. (2003). An Internet vision: the invisible global infrastructure. *Ad Hoc Networks*, *1*(1), 3-11.
- Kolade, O., & Owoseni, A. (2022). Employment 5.0: The work of the future and the future of work [ID: 271744]. *Technology in Society*, *71*, 102086. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102086>
- Konopik, J., Jahn, C., Schuster, T., Hoßbach, N., & Pflaum, A. (2022). Mastering the digital transformation through organizational capabilities: A conceptual framework [ID: 778124]. *Digital Business*, *2*(2), 100019. <https://doi.org/10.1016/j.digbus.2021.100019>
- Kraus, S., Jones, P., Kailer, N., Weinmann, A., Chaparro-Banegas, N., & Roig-Tierno, N. (2021). Digital Transformation: An Overview of the Current State of the Art of Research. *SAGE Open*, *11*(3). <https://doi.org/10.1177/21582440211047576>
- Kumar, S., Ajith, A., Ovsthus, K., & Kristensen, L. M. (2014). An Industrial Perspective on Wireless Sensor Networks — A Survey of Requirements, Protocols, and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *16*(3), 1391-1412. <https://doi.org/10.1109/SURV.2014.012114.00058>
- Laadhar, A., Thomsen, C., & Pedersen, T. B. (2022). domOS Common Ontology: Web of Things Discovery in Smart Buildings. *European Semantic Web Conference*, 95-100.
- Larian, H., Larian, A., Sharifi, M., & Movahednejad, H. (2022). Towards web of things middleware: a systematic review. *arXiv preprint arXiv:2201.08456*.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0 [ID: Lasi2014]. *Business & Information Systems Engineering*, *6*(4), 239-242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Lee, E., Seo, Y.-D., Oh, S.-R., & Kim, Y.-G. (2021). A Survey on Standards for Interoperability and Security in the Internet of Things. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *23*(2), 1020-1047.
- Lefranc, G., Lopez-Juarez, I., Osorio-Comparán, R., & Peña-Cabrera, M. (2022). Impact of Cobots on automation [ID: 280203]. *Procedia Computer Science*, *214*, 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.150>
- Legner, C., Eymann, T., Hess, T., Matt, C., Böhm, T., Drews, P., Mädche, A., Urbach, N., & Ahlemann, F. (2017). Digitalization: opportunity and challenge for the business and information systems engineering community. *Business & information systems engineering*, *59*, 301-308.

- Leitner, S.-H., & Mahnke, W. (2006). OPC UA–service-oriented architecture for industrial applications. *Softwaretechnik-Trends Band 26, Heft 4*.
- Leng, J., Sha, W., Wang, B., Zheng, P., Zhuang, C., Liu, Q., Wuest, T., Mourtzis, D., & Wang, L. (2022). Industry 5.0: Prospect and retrospect. *Journal of Manufacturing Systems, 65*, 279-295. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.017>
- Li, D., Landström, A., Fast-Berglund, Å., & Almström, P. (2019). Human-centred dissemination of data, information and knowledge in industry 4.0. *Procedia CIRP, 84*, 380-386.
- Li, Q., Tang, Q., Chan, I., Wei, H., Pu, Y., Jiang, H., Li, J., & Zhou, J. (2018). Smart manufacturing standardization: Architectures, reference models and standards framework. *Computers in Industry, 101*, 91-106.
- Liao, Y., Deschamps, F., de Freitas Rocha Loures, E., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal [doi: 10.1080/00207543.2017.1308576]. *International Journal of Production Research, 55*(12), 3609-3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry [ID: 271750]. *Journal of Cleaner Production, 115*, 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>
- Lin, S.-W., Miller, B., Durand, J., Joshi, R., Didier, P., Chigani, A., Torenbeek, R., Duggal, D., Martin, R., & Bleakley, G. (2015). Industrial internet reference architecture. *Industrial Internet Consortium (IIC), Tech.Rep.*
- Liu, F., Niu, B., Xing, M., Wu, L., & Feng, Y. (2021). Optimal cross-trained worker assignment for a hybrid seru production system to minimize makespan and workload imbalance. *Computers & Industrial Engineering, 160*, 107552.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues [ID: 314107]. *Journal of Industrial Information Integration, 6*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Machorro-Cano, I., Paredes-Valverde, M. A. ', Alor-Hernandez, G., del Pilar Salas-Z 'arate, M. ', Segura-Ozuna, M. ' G., & 'anchez-Cervantes, J. ' L. S. (2019). PESSHIoT: Smart Platform for Monitoring and Controlling Smart Home Devices and Sensors. En R. Valencia-Garc 'ia, G. Alcaraz-M 'armol, J. D. Cioppo-Morstadt, N. Vera-Lucio & M. Bucaram-Leverone (Eds.), *Technologies and Innovation* (pp. 137-150). Springer International Publishing.
- Mahnke, W., Leitner, S.-H., & Damm, M. (2009). *OPC Unified Architecture*. Springer Science & Business Media.
- Martínez-Peláez, R., Escobar, M. A., Félix, V. G., Ostos, R., Parra-Michel, J., García, V., Ochoa-Brust, A., Velarde-Alvarado, P., Félix, R. A., Olivares-Bautista, S., Flores, V., & Mena, L. J. (2024). Sustainable Digital Transformation for SMEs: A Comprehensive Framework for Informed Decision-Making. *Sustainability, 16*(11). <https://doi.org/10.3390/su16114447>
- Matt, C., Hess, T., & Benlian, A. (2015). Digital Transformation Strategies [ID: Matt2015]. *Business & Information Systems Engineering, 57*(5), 339-343. <https://doi.org/10.1007/s12599-015-0401-5>
- McKinsey. (2018). Automation and the workforce of the future [Accessed: 2023-09-28].
- Meindl, B., Ayala, N. F., Mendonça, J., & Frank, A. G. (2021). The four smarts of Industry 4.0: Evolution of ten years of research and future perspectives. *Technological Forecasting and Social Change, 168*, 120784.

- Melby, A. K., Lommel, A., Rasmussen, N., & Housley, J. (2012). The Language Interoperability Portfolio (Linport) Project: Towards an open, nonproprietary format for packaging translation materials. *The Journal of Internationalization and Localization*, 2(1), 21-35.
- Mentes, M. (2023). Sustainable development economy and the development of green economy in the European Union. *Energy, Sustainability and Society*, 13(1), 32.
- Mer, A., & Viridi, A. S. (2024). Decoding the Challenges and Skill Gaps in Small- and Medium-Sized Enterprises in Emerging Economies: A Review and Research Agenda. En A. M. Thake, K. Sood, E. Özen & S. Grima (Eds.), *Contemporary Challenges in Social Science Management: Skills Gaps and Shortages in the Labour Market* (pp. 115-134, Vol. 112B). Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/S1569-37592024000112B007>
- Moghaddam, M., Cadavid, M. N., Kenley, C. R., & Deshmukh, A. V. (2018). Reference architectures for smart manufacturing: A critical review. *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 215-225.
- Moghrabi, I. A. R., Bhat, S. A., Szczuko, P., AlKhaled, R. A., & Dar, M. A. (2023). Digital Transformation and Its Influence on Sustainable Manufacturing and Business Practices. *Sustainability*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/su15043010>
- Mouser Electronics. (2023). A Look at the Future: Industry 5.0.
- Murawat, S., Tahir, F., Anjum, M., Soomro, M. A., Siraj, S., Memon, Z., Muhammad, A., & Bux, K. (2020). WoT Communication Protocol Security and Privacy Issues. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(3).
- Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A Human-Centric Solution. *Sustainability*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/su11164371>
- Nakagawa, E. Y., Antonino, P. O., Schnicke, F., Capilla, R., Kuhn, T., & Liggesmeyer, P. (2021). Industry 4.0 reference architectures: State of the art and future trends [ID: 271420]. *Computers & Industrial Engineering*, 156, 107241. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107241>
- Ndlovu, K., Scott, R. E., & Mars, M. (2021). Interoperability opportunities and challenges in linking mhealth applications and eRecord systems: Botswana as an exemplar. *BMC medical informatics and decision making*, 21(1), 1-12.
- Neu-Baker, N. M., Eastlake, A., & Hodson, L. (2022). Results of the 2019 Survey of Engineered Nanomaterial Occupational Health and Safety Practices [LR: 20220827; LID: 7676; JID: 101238455; 0 (Nanotubes, Carbon); 7440-57-5 (Gold); OTO: NOTNLM; 2022/05/23 00:00 [received]; 2022/06/15 00:00 [revised]; 2022/06/20 00:00 [accepted]; 2022/07/09 01:06 [entrez]; 2022/07/10 06:00 [pubmed]; 2022/07/14 06:00 [medline]; AID: ijerph19137676 [pii]; AID: ijerph-19-07676 [pii]; epubli]. *International journal of environmental research and public health*, 19(13), 7676. doi: 10.3390/ijerph19137676. <https://doi.org/10.3390/ijerph19137676>
- Nevmerzhitskaya, J., Norvanto, E., & Virag, C. (2019). High Impact Cybersecurity Capacity Building. *eLearning & Software for Education*, 2.
- Node-OPCUA. (2024). Node-OPCUA: Open Source implementation of OPC-UA [Accessed: 2024-09-12].
- Noura, M., Atiquzzaman, M., & Gaedke, M. (2019). Interoperability in internet of things: Taxonomies and open challenges. *Mobile networks and applications*, 24, 796-809.
- Ordieres-Meré, J., Gutierrez, M., & Villalba-Díez, J. (2023). Toward the industry 5.0 paradigm: Increasing value creation through the robust integration of humans and machines. *Computers in Industry*, 150, 103947.

- Pal, K. (2022). Semantic Interoperability in Internet of Things: Architecture, Protocols, and Research Challenges. *Management Strategies for Sustainability, New Knowledge Innovation, and Personalized Products and Services*, 140-171.
- Panetto, H., & Molina, A. (2008). Enterprise integration and interoperability in manufacturing systems: Trends and issues. *Computers in Industry*, 59(7), 641-646.
- Park, A., Wilson, M., Robson, K., Demetis, D., & Kietzmann, J. (2023). Interoperability: Our exciting and terrifying Web3 future. *Business horizons*, 66(4), 529-541.
- Paschek, D., Luminosu, C.-T., & Ocakci, E. (2022). Industry 5.0 Challenges and Perspectives for Manufacturing Systems in the Society 5.0 [ID: Paschek2022]. En A. Draghici & L. Ivascu (Eds.). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7365-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7365-8_2)
- Pauker, F., Frühwirth, T., Kittl, B., & Kastner, W. (2016). A systematic approach to OPC UA information model design. *Procedia CIRP*, 57, 321-326.
- Pedone, G., & Mezgár, I. (2018). Model similarity evidence and interoperability affinity in cloud-ready Industry 4.0 technologies. *Computers in Industry*, 100, 278-286.
- Perales, D. P., Valero, F. A. ', & 'ia, A. ' B. G. (2018). Industry 4.0: A Classification Scheme. En A. L. Elisabeth Viles Marta Ormazábal (Ed.), *Closing the Gap Between Practice and Research in Industrial Engineering* (pp. 343-350). Springer International Publishing.
- Pereira, R. M., Szejka, A. L., & Junior, O. C. (2021). Towards an information semantic interoperability in smart manufacturing systems: Contributions, limitations and applications. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(4), 422-439.
- Pflaum, A. A., & Gözler, P. (2018). The IoT and Digital Transformation: Toward the Data-Driven Enterprise [ID: 1]. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2018.011591066>
- Piroumian, V. (2021). Digital twins: Universal interoperability for the digital age. *Computer*, 54(1), 61-69.
- Pollock, J. T., & Hodgson, R. (2004). *Adaptive information: improving business through semantic interoperability, grid computing, and enterprise integration*. John Wiley & Sons.
- Pratt, A., & Nunes, J. (2012). *Interactive design: An introduction to the theory and application of user-centered design*. Rockport Pub.
- Pribiš, R., Beňo, L., & Drahoš, P. (2019). Implementation of Micro embedded OPC Unified Architecture server-client. *IFAC-PapersOnLine*, 52(27), 114-120.
- Priyono, A., Moin, A., & Putri, V. N. A. O. (2020). Identifying digital transformation paths in the business model of SMEs during the COVID-19 pandemic. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(4), 104.
- Prometheus.io. (2024). Prometheus: Monitoring system & time series database [Accessed: 2024-09-12].
- Puhovichova, D., & Jankelova, N. (2020). Changes of human resource management in the context of impact of the fourth industrial revolution. *Industry 4.0*, 5(3), 138-141.
- Puspaningrum, A. (2020). Market orientation, competitive advantage and marketing performance of small medium enterprises (SMEs). *Journal of Economics, Business, & Accountancy Ventura*, 23(1), 19-27.
- Qi, Y., Han, M., & Zhang, C. (2024). The Synergistic Effects of Digital Technology Application and ESG Performance on Corporate Performance. *Finance Research Letters*, 61, 105007. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fr.l.2024.105007>

- Ragazou, K., Passas, I., & Sklavos, G. (2022). Investigating the Strategic Role of Digital Transformation Path of SMEs in the Era of COVID-19: A Bibliometric Analysis Using R. *Sustainability*, *14*(18), 11295. <https://doi.org/10.3390/su141811295>
- Rahman, H., & Hussain, M. I. (2020). A comprehensive survey on semantic interoperability for Internet of Things: State-of-the-art and research challenges. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, *31*(12), e3902.
- Rajput, S., & Singh, S. P. (2021). Industry 4.0 challenges to implement circular economy. *Benchmarking: An International Journal*, *28*(5), 1717-1739.
- Rejeb, A., Rejeb, K., Simske, S., Treiblmaier, H., & Zailani, S. (2022). The Big Picture on the Internet of Things and the Smart City: A Review of What We Know and What We Need to Know. *Internet of Things*, *19*, 100565. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100565>
- Resman, M., Pipan, M., Šimic, M., & Herakovič, N. (2019). A new architecture model for smart manufacturing: A performance analysis and comparison with the RAMI 4.0 reference model. *Adv.Prod.Eng.Manag*, *14*(2), 153-165.
- Riley, C. (2020). Unpacking interoperability in competition. *Journal of Cyber Policy*, *5*(1), 94-106.
- Rodríguez-Espíndola, O., Chowdhury, S., Dey, P. K., Albores, P., & Emrouznejad, A. (2022). Analysis of the adoption of emergent technologies for risk management in the era of digital manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*, *178*, 121562.
- Romkey, J. (2017). Toast of the IoT: The 1990 Interop Internet Toaster [ID: 1]. <https://doi.org/10.1109/MCE.2016.2614740>
- Roy, A. (2020). The Fourth Industrial Revolution [doi: 10.1080/08961530.2020.1727164]. *Journal of International Consumer Marketing*, *32*(3), 268-270. <https://doi.org/10.1080/08961530.2020.1727164>
- Rupeika-Apoga, R., Bule, L., & Petrovska, K. (2022). Digital Transformation of Small and Medium Enterprises: Aspects of Public Support. *Journal of Risk and Financial Management*, *15*(2), 45. <https://doi.org/10.3390/jrfm15020045>
- Sabando-Vera, D., Yonfa-Medrandá, M., Montalván-Burbano, N., Albors-Garrigos, J., & Parrales-Guerrero, K. (2022). Worldwide Research on Open Innovation in SMEs [ID: 782866]. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, *8*(1), 20. <https://doi.org/10.3390/joitmc8010020>
- Sadeghi, A.-R., Wachsmann, C., & Waidner, M. (2015). Security and privacy challenges in industrial internet of things. *Proceedings of the 52nd annual design automation conference*, 1-6.
- Saeedikiya, M., Salunke, S., & Kowalkiewicz, M. (2024). Toward a dynamic capability perspective of digital transformation in SMEs: A study of the mobility sector. *Journal of Cleaner Production*, *439*, 140718. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140718>
- Saleem, J., Hammoudeh, M., Raza, U., Adebisi, B., & Ande, R. (2018). IoT standardisation: Challenges, perspectives and solution. *Proceedings of the 2nd international conference on future networks and distributed systems*, 1-9.
- Sambhi, S., Sambhi, S., & Bhadoria, V. S. (2021). IoT-based optimized and secured ecosystem for energy internet: The state-of-the-art. *Internet of Things in Business Transformation: Developing an Engineering and Business Strategy for Industry 5.0*, 91-125.

- Saniuk, S., Grabowska, S., & Straka, M. (2022). Identification of Social and Economic Expectations: Contextual Reasons for the Transformation Process of Industry 4.0 into the Industry 5.0 Concept. *Sustainability*, *14*(3). <https://doi.org/10.3390/su14031391>
- Sauro, J., & Lewis, J. R. (2016). *Quantifying the User Experience: Practical Statistics for User Research* (2.<sup>a</sup> ed.). Morgan Kaufmann.
- Schmeelk, S., Kanabar, M., Peterson, K., & Pathak, J. (2022). Electronic health records and blockchain interoperability requirements: a scoping review. *JAMIA Open*, *5*(3), ooac068. <https://doi.org/10.1093/jamiaopen/ooac068>
- Scholten, B. (2007). *The road to integration: A guide to applying the ISA-95 standard in manufacturing*. Isa.
- Schwab, K. (2017). *The fourth industrial revolution*. Currency.
- Serpanos, D., Wolf, M., Serpanos, D., & Wolf, M. (2018). Industrial internet of things. *Internet-of-Things (IoT) Systems: Architectures, Algorithms, Methodologies*, 37-54.
- Serror, M., Hack, S., Henze, M., Schuba, M., & Wehrle, K. (2020). Challenges and opportunities in securing the industrial internet of things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *17*(5), 2985-2996.
- Sezer, O., Can, S., & Dogdu, E. (2015). Development of a smart home ontology and the implementation of a semantic sensor network simulator: An Internet of Things approach, 12-18. <https://doi.org/10.1109/CTS.2015.7210389>
- Shabur, M. A. (2024). A comprehensive review on the impact of Industry 4.0 on the development of a sustainable environment. *Discover Sustainability*, *5*(1), 97. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00290-7>
- Sharma, A., & Singh, D. (2020). Evolution of Industrial Revolutions: A Review. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, *9*, 66-73. <https://doi.org/10.35940/ijitee.I7144.0991120>
- Sharma, N., Shamkuwar, M., & Singh, I. (2019). The history, present and future with IoT. *Internet of things and big data analytics for smart generation*, 27-51.
- SHOP4CF Consortium. (2020). SHOP4CF Project.
- Silva, D., Carvalho, L. I., Soares, J., & Sofia, R. C. (2021). A performance analysis of internet of things networking protocols: Evaluating MQTT, CoAP, OPC UA. *Applied Sciences*, *11*(11), 4879.
- Silva, J. T. D., Dias, A. L., & Silva, I. N. D. (2023). A Survey on OPC UA Protocol: Overview, Challenges and Opportunities. *2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 1523-1530.
- Simeoni, E., Gaeta, E., García-Betances, R. I., Raggett, D., Medrano-Gil, A. M., Carvajal-Flores, D. F., Fico, G., Cabrera-Umpiérrez, M. F., & Waldmeyer, M. T. A. (2021). A Secure and Scalable Smart Home Gateway to Bridge Technology Fragmentation. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *21*(11), 3587. <https://doi.org/10.3390/s21113587>
- Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. (2018). Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE transactions on industrial informatics*, *14*(11), 4724-4734.
- Skare, M., de las Mercedes de Obesso, M., & Ribeiro-Navarrete, S. (2023). Digital transformation and European small and medium enterprises (SMEs): A comparative study using digital economy and society index data. *International Journal of Information Management*, *68*, 102594.

- Stjepić, A.-M., Bach, M. P., & Vukšić, V. B. (2021). Exploring risks in the adoption of business intelligence in SMEs using the TOE framework. *Journal of Risk and Financial Management*, *14*(2), 58.
- Sun, S., Zheng, X., Villalba-Díez, J., & Ordieres-Meré, J. (2020). Data handling in industry 4.0: Interoperability based on distributed ledger technology. *Sensors*, *20*(11), 3046.
- Suvarna, M., Büth, L., Hejny, J., Mennenga, M., Li, J., Ng, Y. T., Herrmann, C., & Wang, X. (2020). Smart manufacturing for smart cities—overview, insights, and future directions. *Advanced Intelligent Systems*, *2*(10), 2000043.
- Tabim, V. M., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2021). Implementing Vertical Integration in the Industry 4.0 Journey: Which Factors Influence the Process of Information Systems Adoption? [ID: Tabim2021]. *Information Systems Frontiers*. <https://doi.org/10.1007/s10796-021-10220-x>
- Teng, X., Wu, Z., & Yang, F. (2022). Research on the relationship between digital transformation and performance of SMEs. *Sustainability*, *14*(10), 6012.
- Tepe, E., Busboom, A., & Müller, M. (2022). A transformation framework for semantic interoperability in Industry 4.0. *IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1-6.
- Terhoeven, J., Tegtmeier, P., & Wischniewski, S. (2022). Human-centred work design in times of digital change—work conditions, level of digitization and recent trends for object-related tasks. *Procedia CIRP*, *107*, 302-307.
- Tsou, H.-T., & Chen, J.-S. (2021). How does digital technology usage benefit firm performance? Digital transformation strategy and organisational innovation as mediators [doi: 10.1080/09537325.2021.1991575]. *Technology Analysis & Strategic Management*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/09537325.2021.1991575>
- Tu, X., Autiosalo, J., Ala-Laurinaho, R., Yang, C., Salminen, P., & Tammi, K. (2023). TwinXR: Method for using digital twin descriptions in industrial eXtended reality applications. *Frontiers in Virtual Reality*, *4*, 1019080.
- United Nations Conference on Trade and Development. (2022). *Industry 4.0: Concept and main characteristics*. <https://doi.org/10.18356/9789210014441c005>
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS quarterly*, 425-478.
- Vimal, S., Jeyabalaraja, V., Subbulakshmi, P., Suresh, A., Kaliappan, M., & Koteeswaran, S. (2020). Deep learning-based decision-making with WoT for smart city development. CRC Press.
- Vogelsang, K., Liere-Netheler, K., Packmohr, S., & Hoppe, U. (2019). Barriers to digital transformation in manufacturing: development of a research agenda.
- Vrontis, D., Chaudhuri, R., & Chatterjee, S. (2022). Adoption of Digital Technologies by SMEs for Sustainability and Value Creation: Moderating Role of Entrepreneurial Orientation. *Sustainability*, *14*(13). <https://doi.org/10.3390/su14137949>
- W3C World Wide Web Consortium. (2023a). W3C Web of Things.
- W3C World Wide Web Consortium. (2023b, julio). Web of Things (WoT) Architecture 1.1.
- Walden, A., Garvin, L., Smerek, M., & Johnson, C. (2020). User-centered design principles in the development of clinical research tools [PMID: 32815381]. *Clinical Trials*, *17*(6), 703-711. <https://doi.org/10.1177/1740774520946314>
- Wallach, D., & Scholz, S. C. (2012). User-Centered Design: Why and How to Put Users First in Software Development. En A. Maedche, A. Botzenhardt & L. Neer (Eds.),

- Software for People: Fundamentals, Trends and Best Practices* (pp. 11-38). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-31371-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31371-4_2)
- Wang, J., Lim, M. K., Wang, C., & Tseng, M.-L. (2021). The evolution of the Internet of Things (IoT) over the past 20 years. *Computers & Industrial Engineering*, *155*, 107174.
- Wang, X. V., Wang, L., & Gördes, R. (2018). Interoperability in cloud manufacturing: a case study on private cloud structure for SMEs. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *31*(7), 653-663.
- Wardati, N. K., & Mahendrawathi, E. R. (2019). The impact of social media usage on the sales process in small and medium enterprises (SMEs): A systematic literature review. *Procedia Computer Science*, *161*, 976-983.
- Wegner, P. (1996). Interoperability. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, *28*(1), 285-287.
- Weyrich, M., & Ebert, C. (2015). Reference architectures for the internet of things. *IEEE Software*, *33*(1), 112-116.
- Wollschlaeger, M., Sauter, T., & Jasperneite, J. (2017). The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0 [ID: 1]. <https://doi.org/10.1109/MIE.2017.2649104>
- World Economic Forum. (2023). The Future of Jobs Report 2023 [Accessed: 2023-09-28].
- Wübbecke, J., Meissner, M., Zenglein, M. J., Ives, J., & Conrad, B. (2016). Made in china 2025. *Mercator Institute for China Studies. Papers on China*, *2*(74), 4.
- Xu, L., Vrieze, P. D., Yu, H., Phalp, K., & Bai, Y. (2020). Interoperability of the future factory: an overview of concepts and research challenges. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, *13*(1), 3-27.
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International journal of production research*, *56*(8), 2941-2962.
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception [ID: 277340]. *Journal of Manufacturing Systems*, *61*, 530-535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- Yan, B.-N., Lee, T.-S., & Lee, T.-P. (2015). Mapping the intellectual structure of the Internet of Things (IoT) field (2000–2014): A co-word analysis. *Scientometrics*, *105*, 1285-1300.
- Yin, S., & Yu, Y. (2022). An adoption-implementation framework of digital green knowledge to improve the performance of digital green innovation practices for industry 5.0 [ID: 271750]. *Journal of Cleaner Production*, *363*, 132608. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132608>
- Yli-Ojanperä, M., Sierla, S., Papakonstantinou, N., & Vyatkin, V. (2019). Adapting an agile manufacturing concept to the reference architecture model industry 4.0: A survey and case study. *Journal of industrial information integration*, *15*, 147-160.
- Yu, H., Cai, H., Liu, Z., Xu, B., & Jiang, L. (2021). An automated metadata generation method for data lake of industrial WoT applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, *52*(8), 5235-5248.
- Zeid, A., Sundaram, S., Moghaddam, M., Kamarthi, S., & Marion, T. (2019). Interoperability in smart manufacturing: Research challenges. *Machines*, *7*(2), 21.
- Zeng, M. L. (2019). Interoperability. *KO Knowledge Organization*, *46*(2), 122-146.
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review [ID: 314095]. *Engineering*, *3*(5), 616-630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>

- Zimniewicz, M., Domagała-Schmidt, Z., Grefen, P., Traganos, K., & Pantano, M. (2020, diciembre). *D3.2 Architecture SHOP4CF* (M. Zimniewicz, Ed.; inf. téc.) (Grant Agreement No. 873087). SHOP4CF Consortium.
- Zimniewicz, M., Domagała-Schmidt, Z., Grefen, P., Traganos, K., Pantano, M., Olszewski, A., Perez, G., Becue, P., & Carvajal-Flores, D. F. (2021, diciembre). *D3.3 SHOP4CF Architecture 2* (M. Zimniewicz, Ed.; inf. téc.) (Public Dissemination Level). Smart Human Oriented Platform for Connected Factories (SHOP4CF).
- Zuehlke, D. (2019). Industria 4.0: más que una revolución tecnológica. *Revista CEA*, 5(10), 9.



# Anexo A: Cuestionario de Evaluación

(Aromaa et al., [2020](#))

# Appendix 2: Common questionnaire

## Common Questionnaire

1. Background information

What is your gender?  male  female  other  do not want to answer

What is your age? \_\_\_\_\_ years

2. Please indicate your overall feeling of using the solution



3. Below are statements about the system/pilot. Please, mark with X the most suitable option.

Statement	Strongly disagree	Disagree	Neither agree nor disagree	Agree	Strongly agree
I like working with the system					
I would like to use the solution in the future					
I can trust this solution					
I find this solution useful in my job					
Using this solution would improve my job performance					
The solution is easy to use					
The solution supports smooth work practices					
I did not feel physical load while using the solution (e.g. in hands, neck or eyes)					
I did not feel mental load while using the solution (e.g. feeling stressed)					
The usage of the solution does not cause safety risks					
The usage of the solution does not distract my attention					
Using the solution at work does not feel questionable					
The usage of the solution respects my privacy					
This kind of solution would make my work more interesting					
This kind of solution would increase my job satisfaction					



## D2.3 Design and Evaluation Framework for User Studies 1

I think that the solution has potential to improve productivity					
I think that the solution has potential to improve the quality of the manufactured products					



# Anexo B: Resultados del Cuestionario de Factores Humanos

(Abril-Jimenez et al., [2023](#))

# Annex 1 Human factor questionnaire values

## UC1 Arcelik Human factors questionnaire results

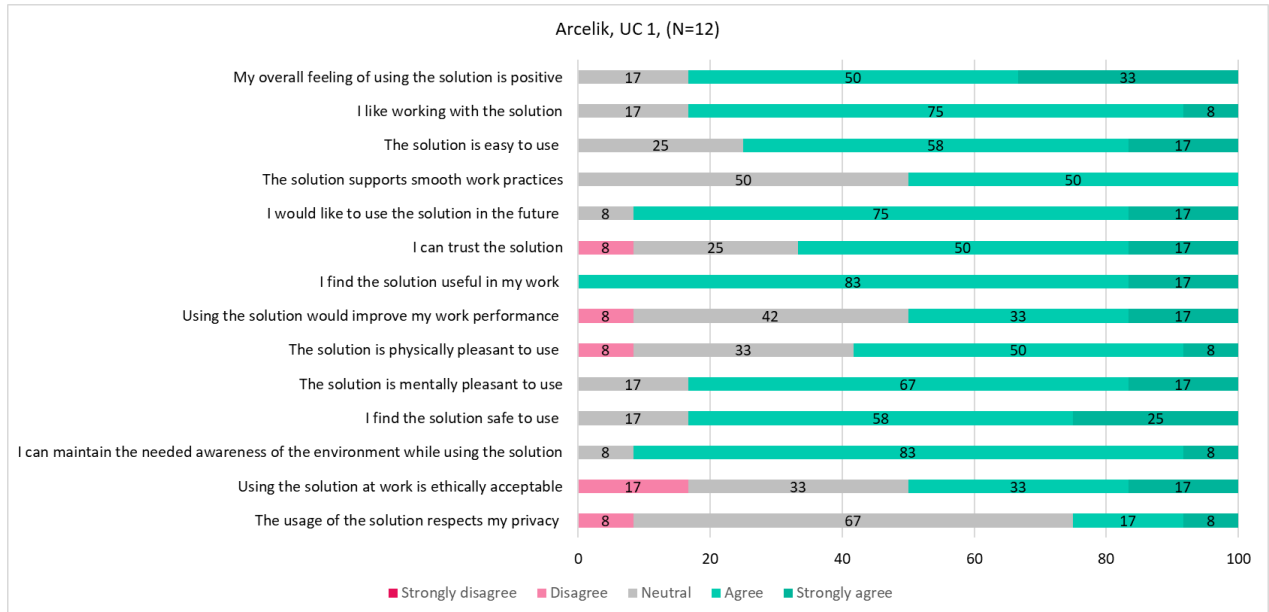


Figure 36. Human factors questionnaire results per question for the Arcelik use case 1.

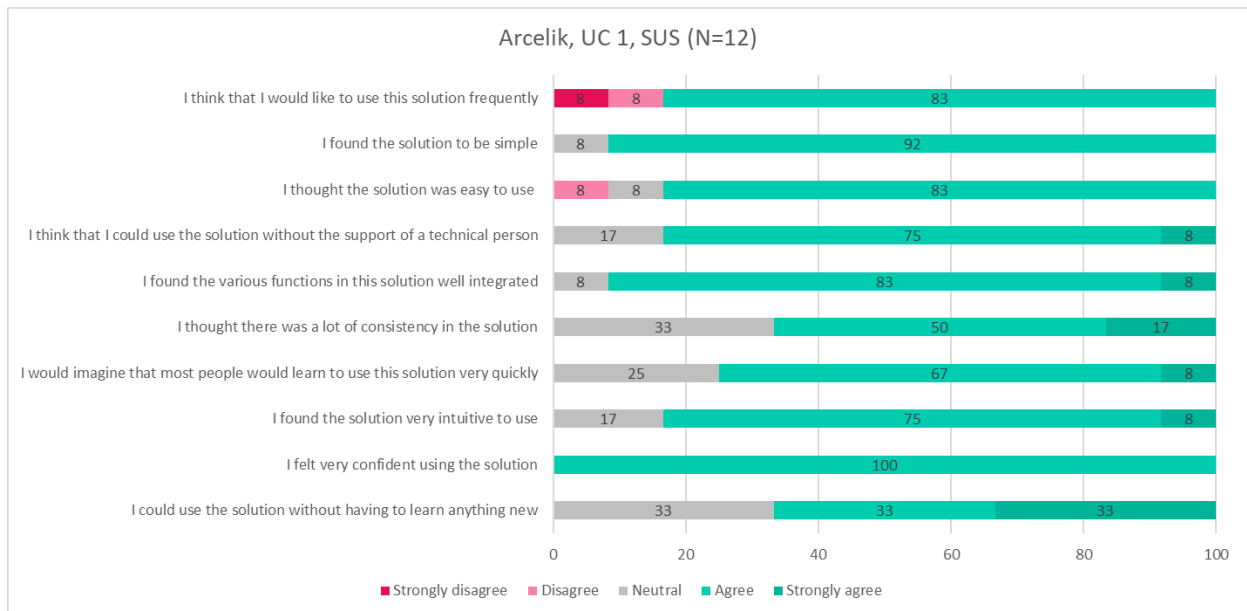


Figure 37. System usability questionnaire results per question for Arcelik use case 1.

UC2 Arcelik Human factors questionnaire results

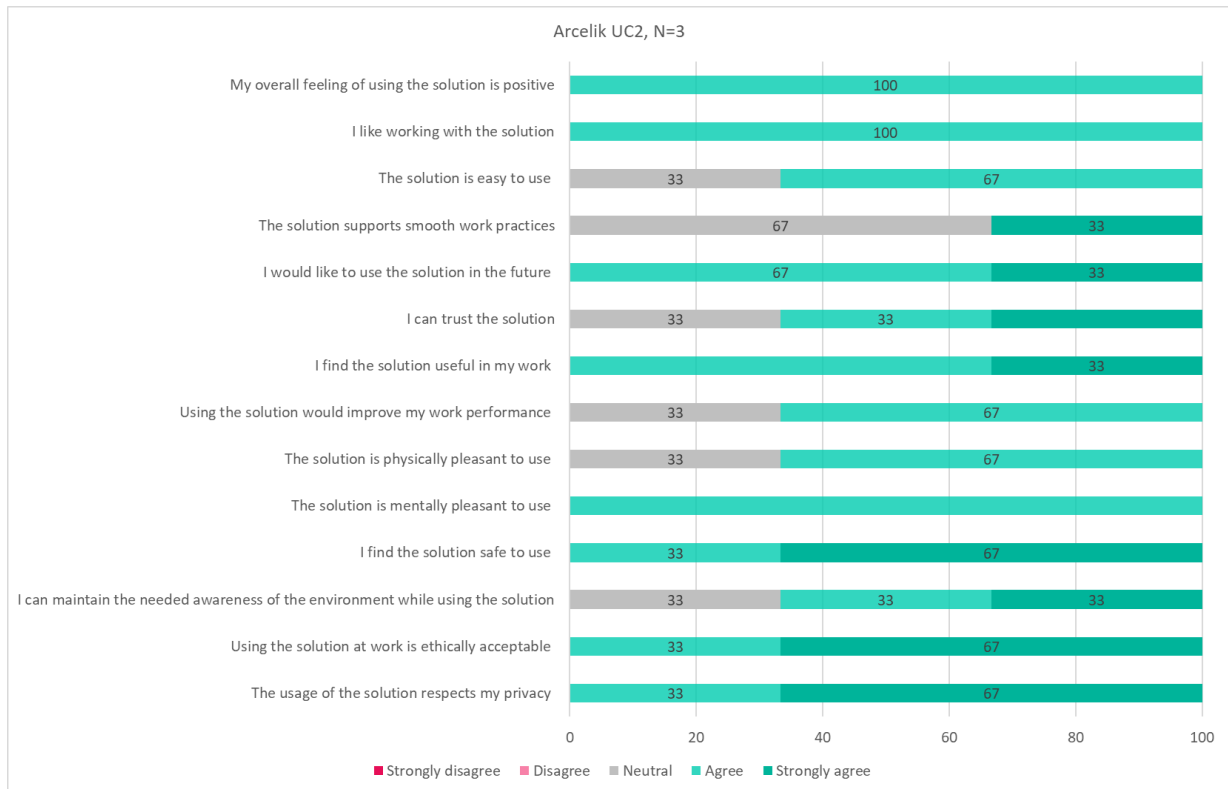


Figure 38. Human factors questionnaire results per question for the Arcelik use case 2.

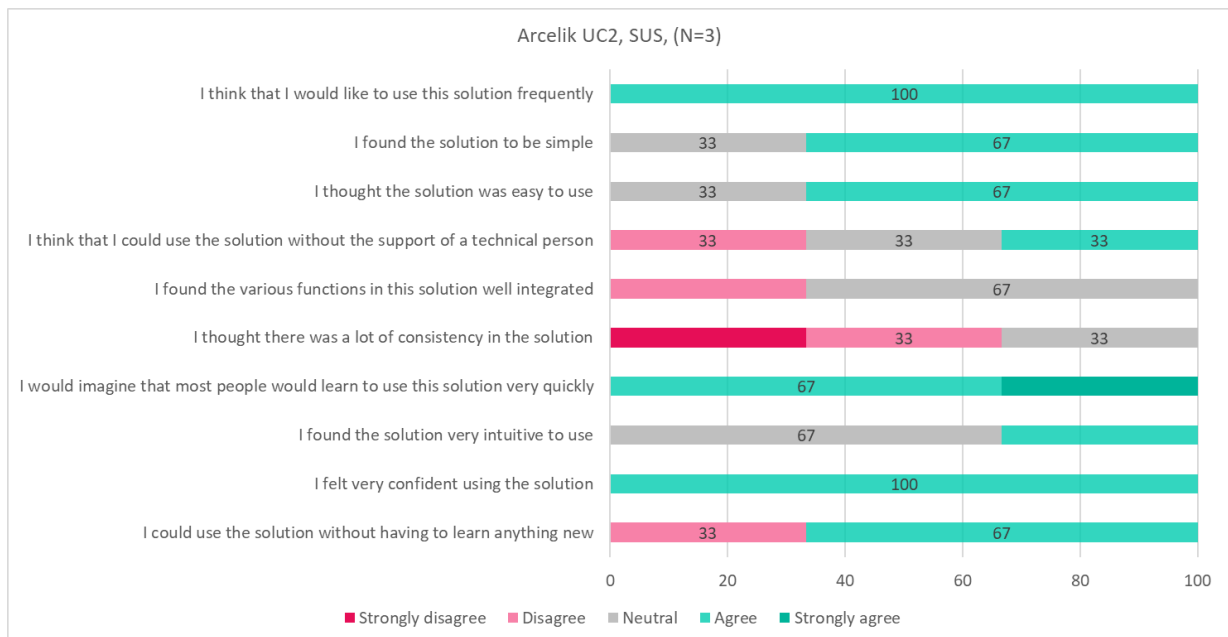


Figure 39. System usability questionnaire results per question for Arcelik use case 2.

**UC1BOSCH Human factors questionnaire results**

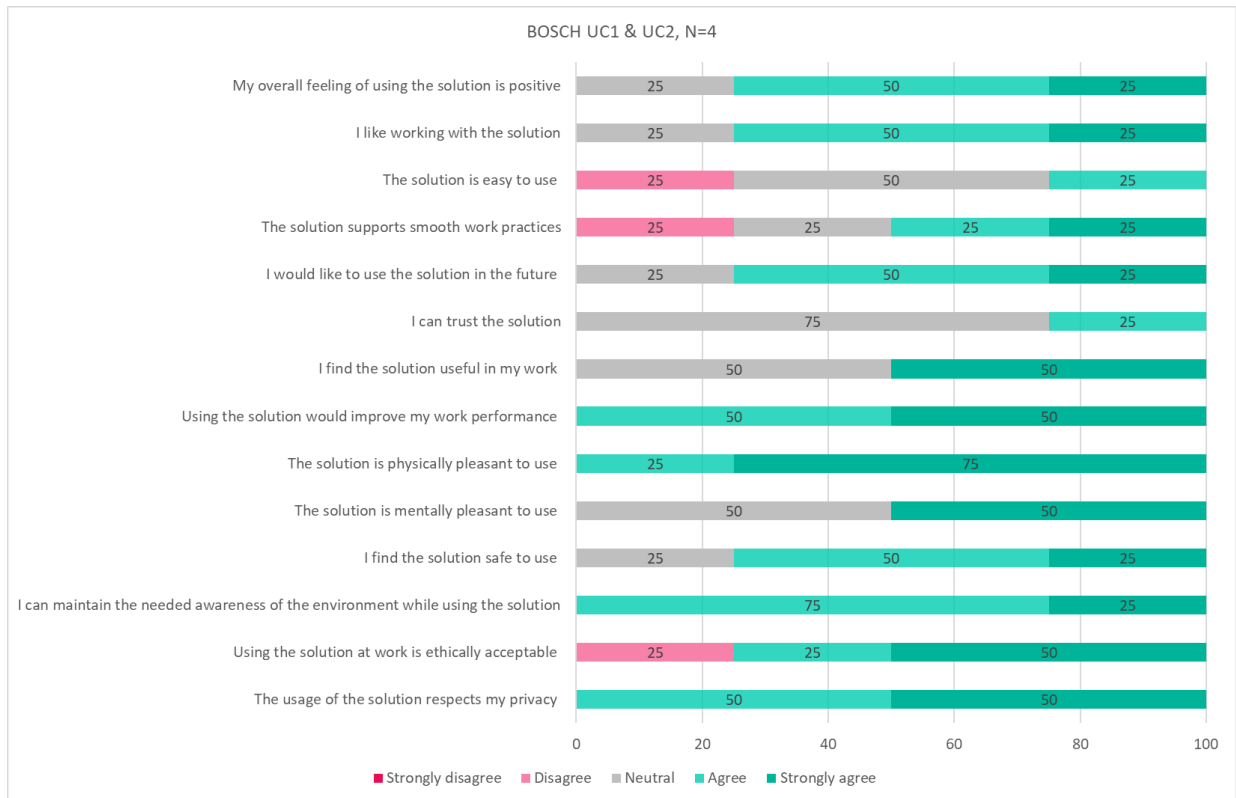


Figure 40. Human factors questionnaire results per question for the BOS use case 1 and 2.

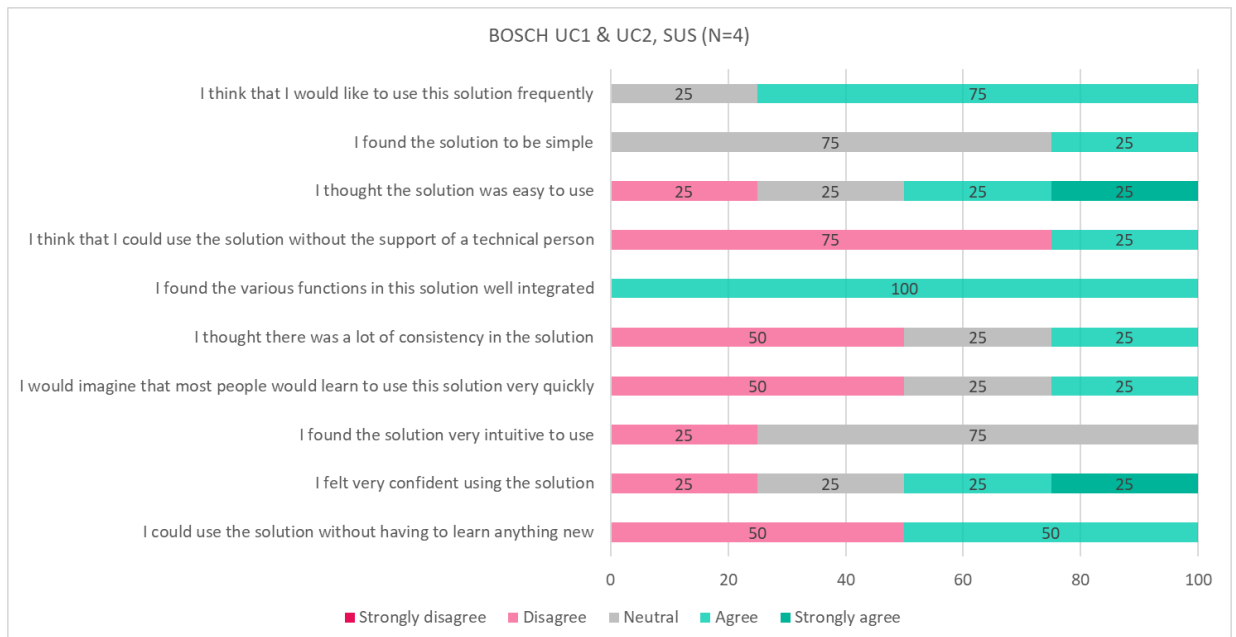


Figure 41. System usability questionnaire results per question for the BOS use case 1 and 2

**UC1 SIEMENS Human factors questionnaire results**

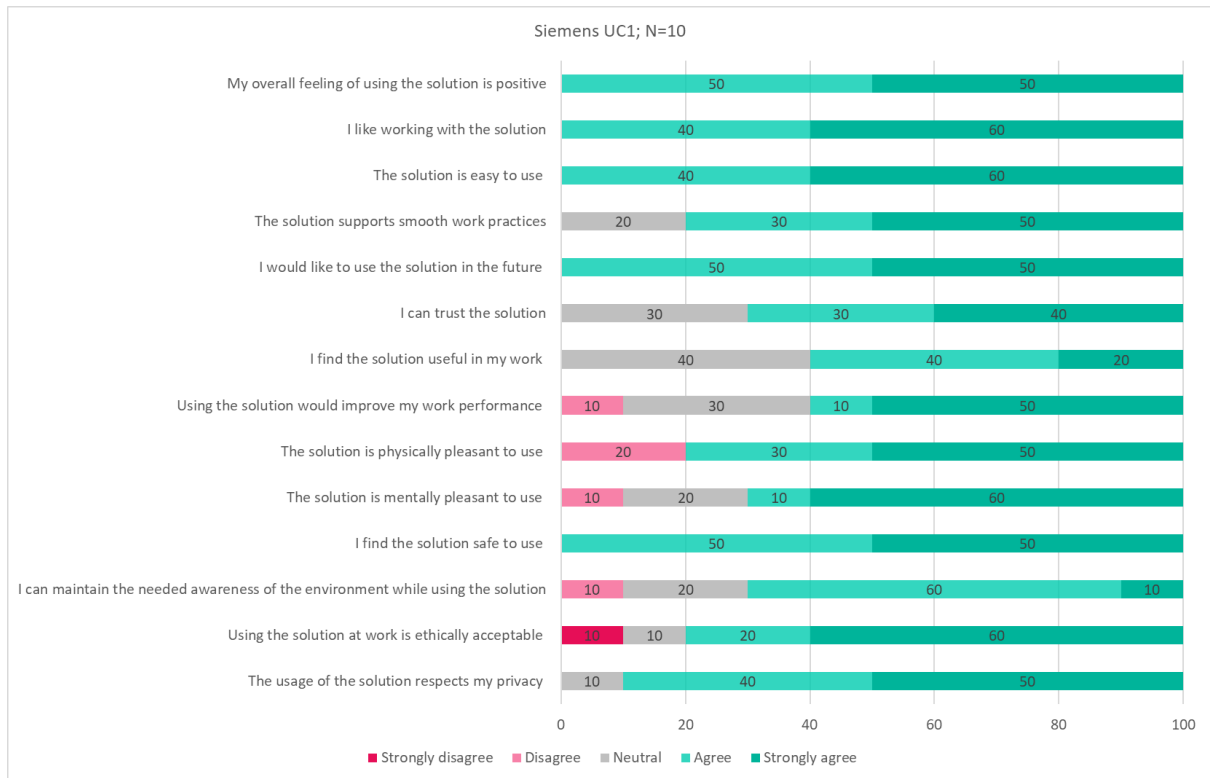


Figure 42. Human factors questionnaire results per question for the Siemens use cases.

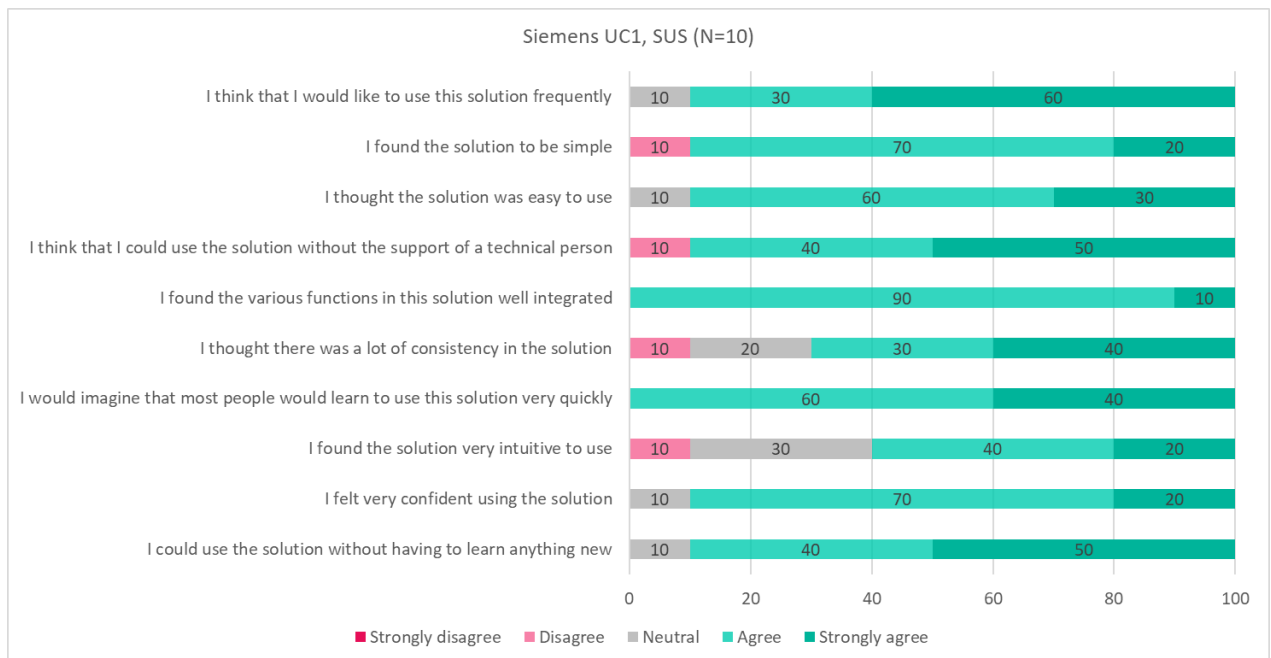


Figure 43. System usability questionnaire results per question

UC1 Volkswagen Human factors questionnaire results

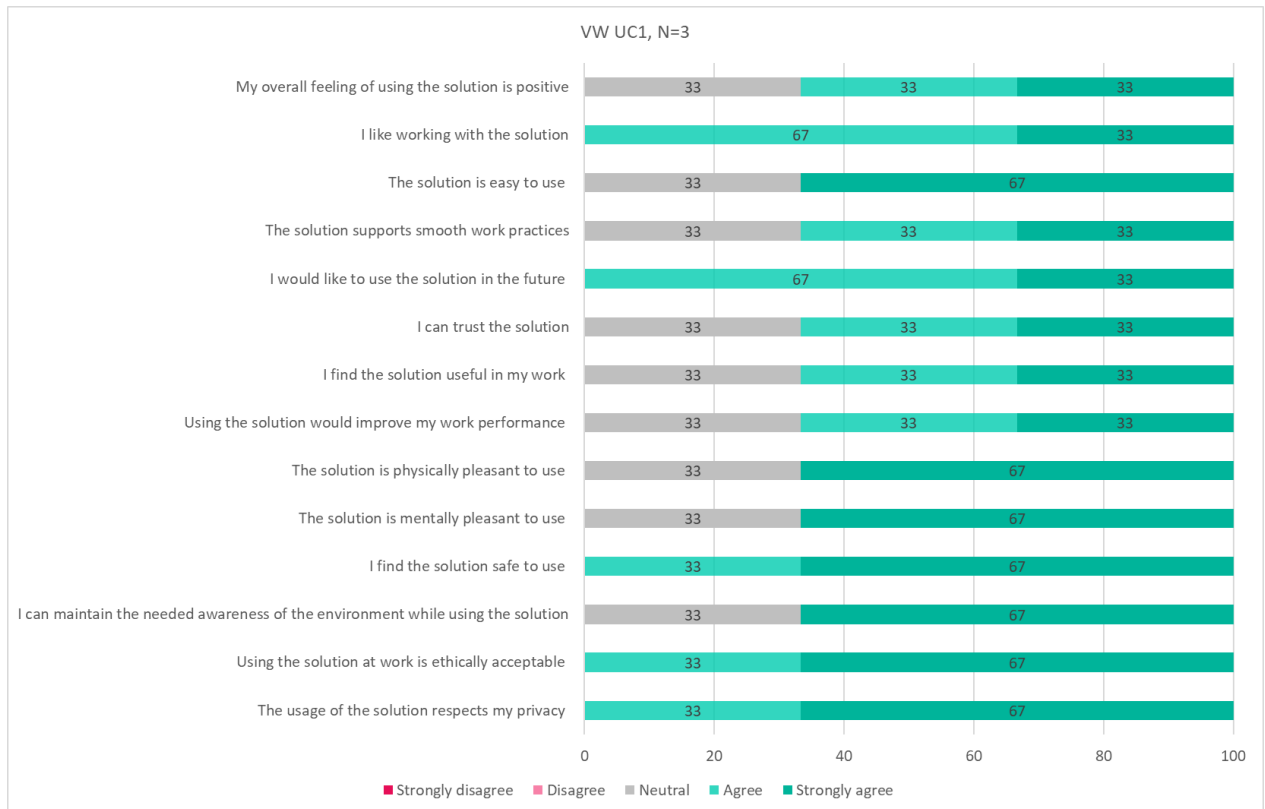


Figure 44. Human factors questionnaire results per question for the Volkswagen use case 1.

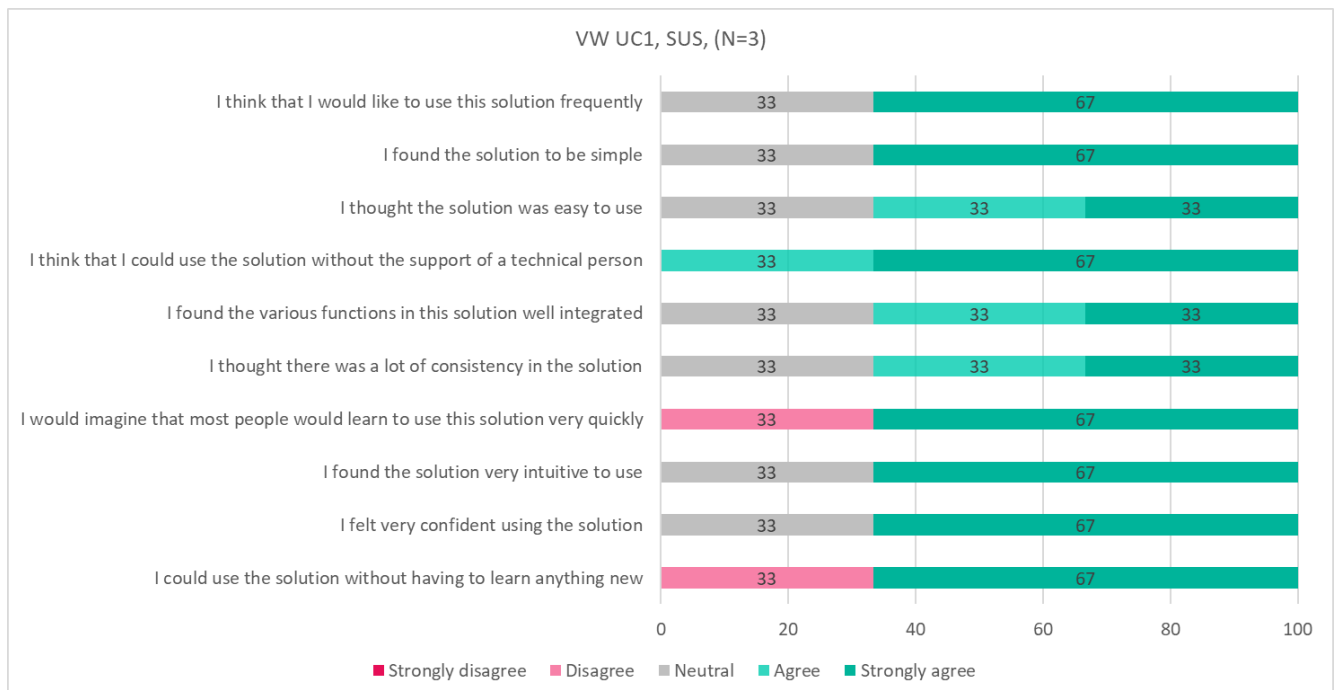


Figure 45. System usability questionnaire results per question for Volkswagen use case 1.

UC2 Volkswagen Human factors questionnaire results

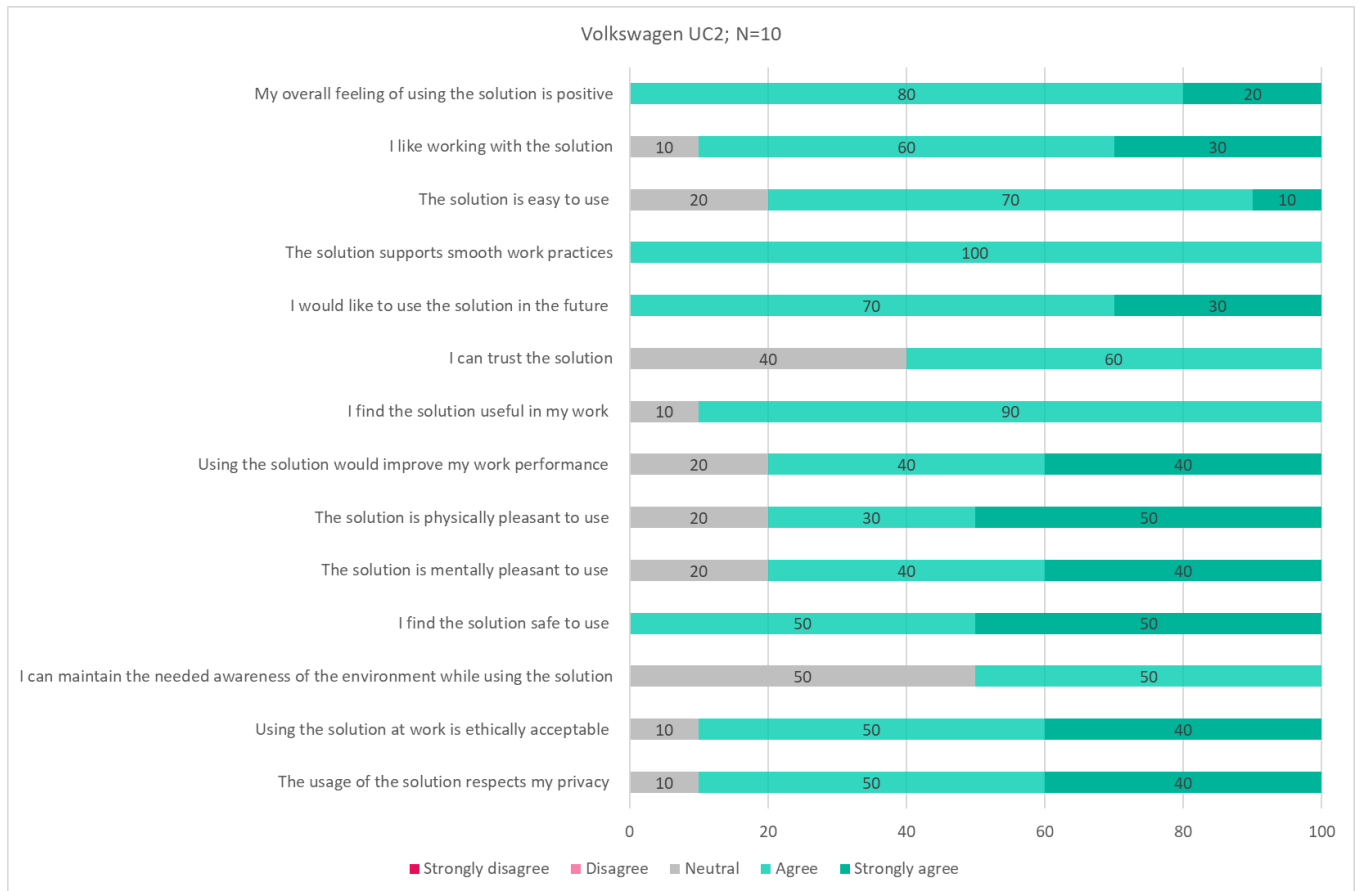


Figure 46. Human factors questionnaire results per question for the Volkswagen use case 2.

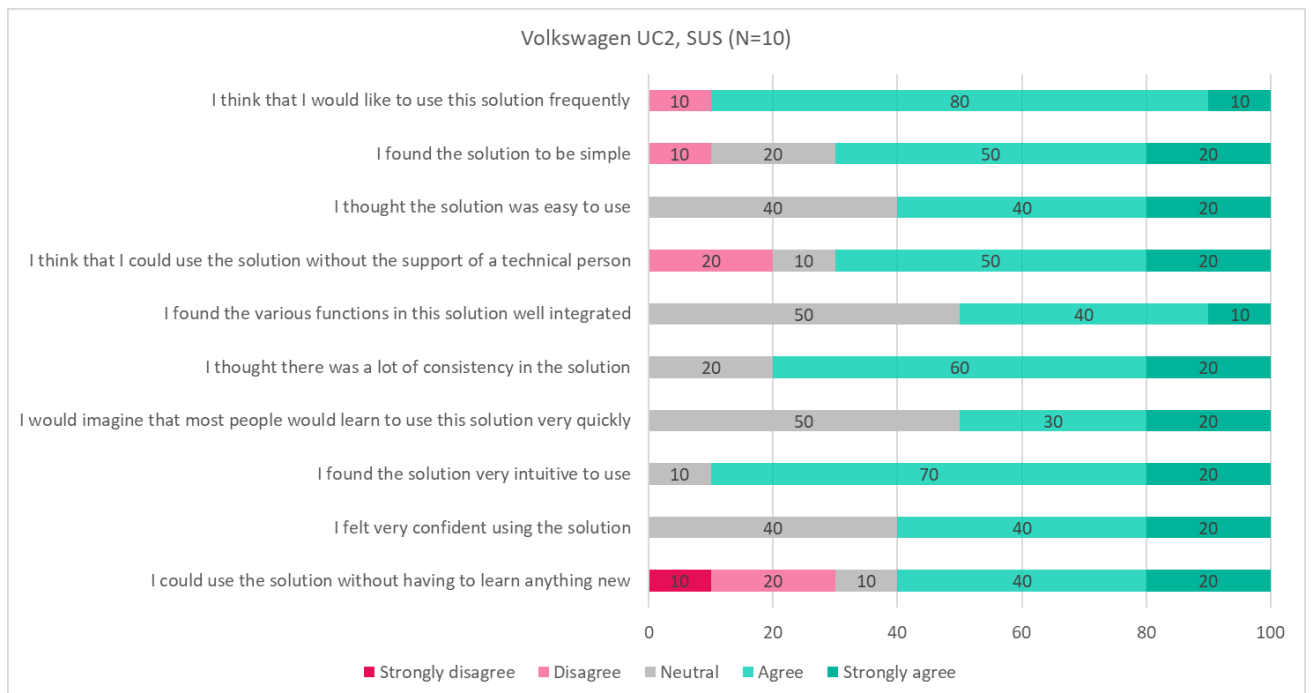


Figure 47. System usability questionnaire results per question for Volkswagen use case 2.

Open call 2 Human factors questionnaire results:

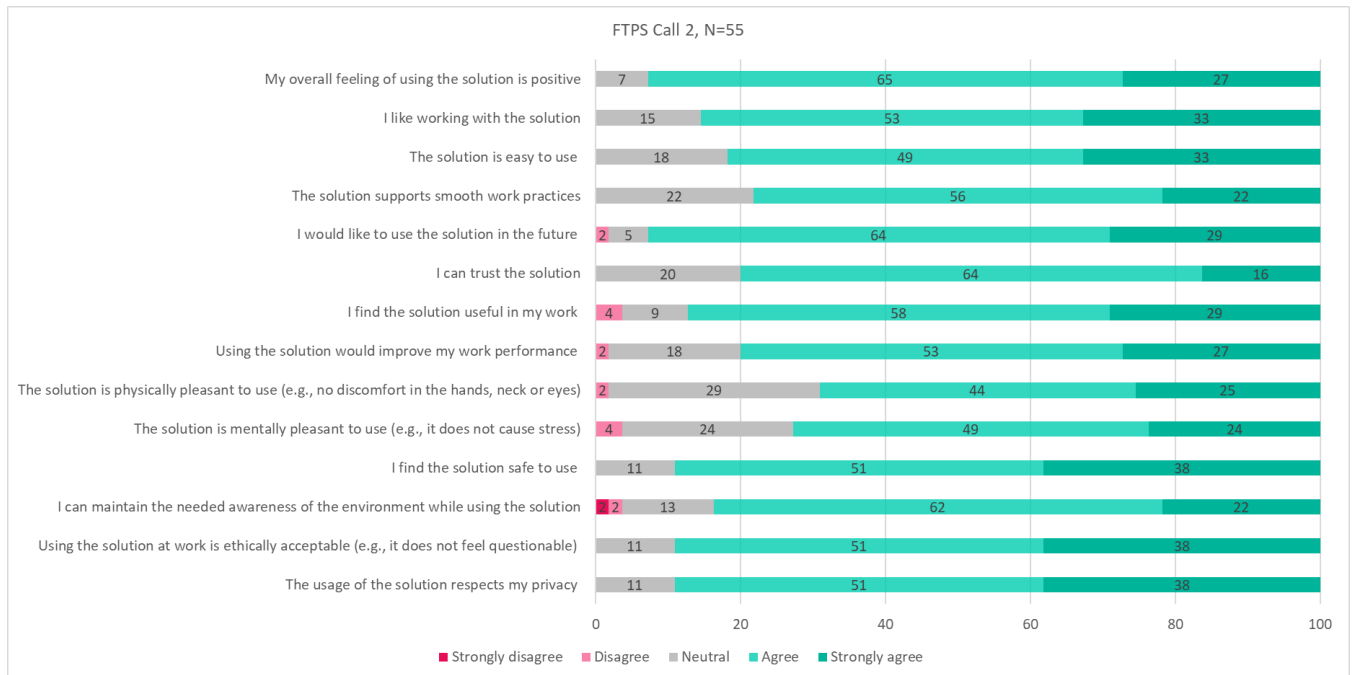


Figure 48. Human factors questionnaire results per question for the Open Call 2.

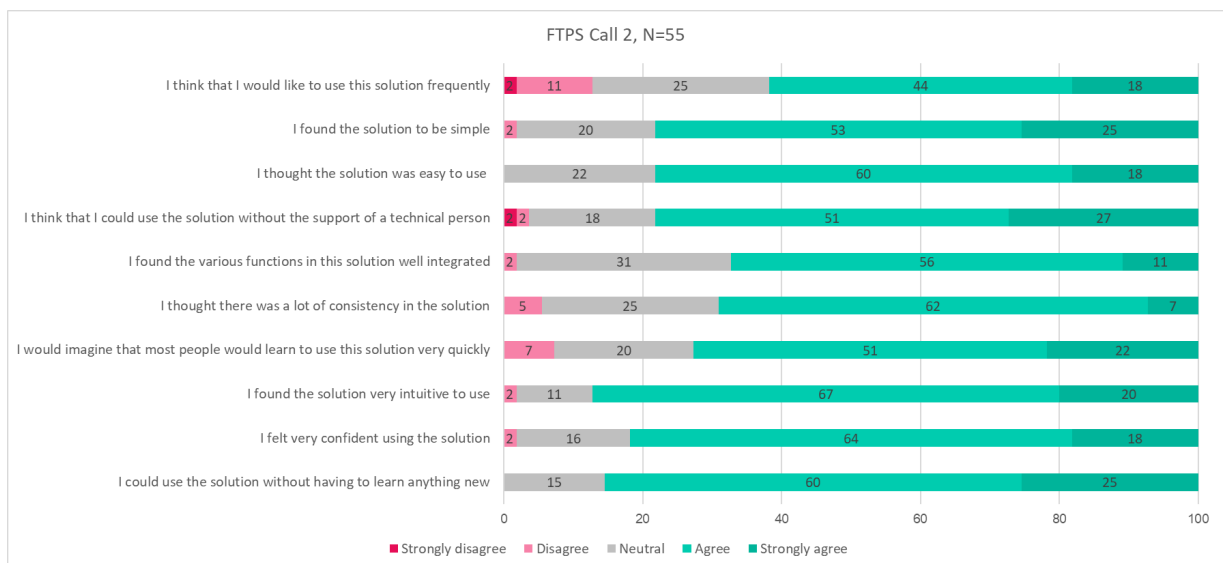


Figure 49. System usability questionnaire results per question.

**Open call 3 Human factors questionnaire results:**

Figure 50. Human factors questionnaire results per question for the Open Call 2.

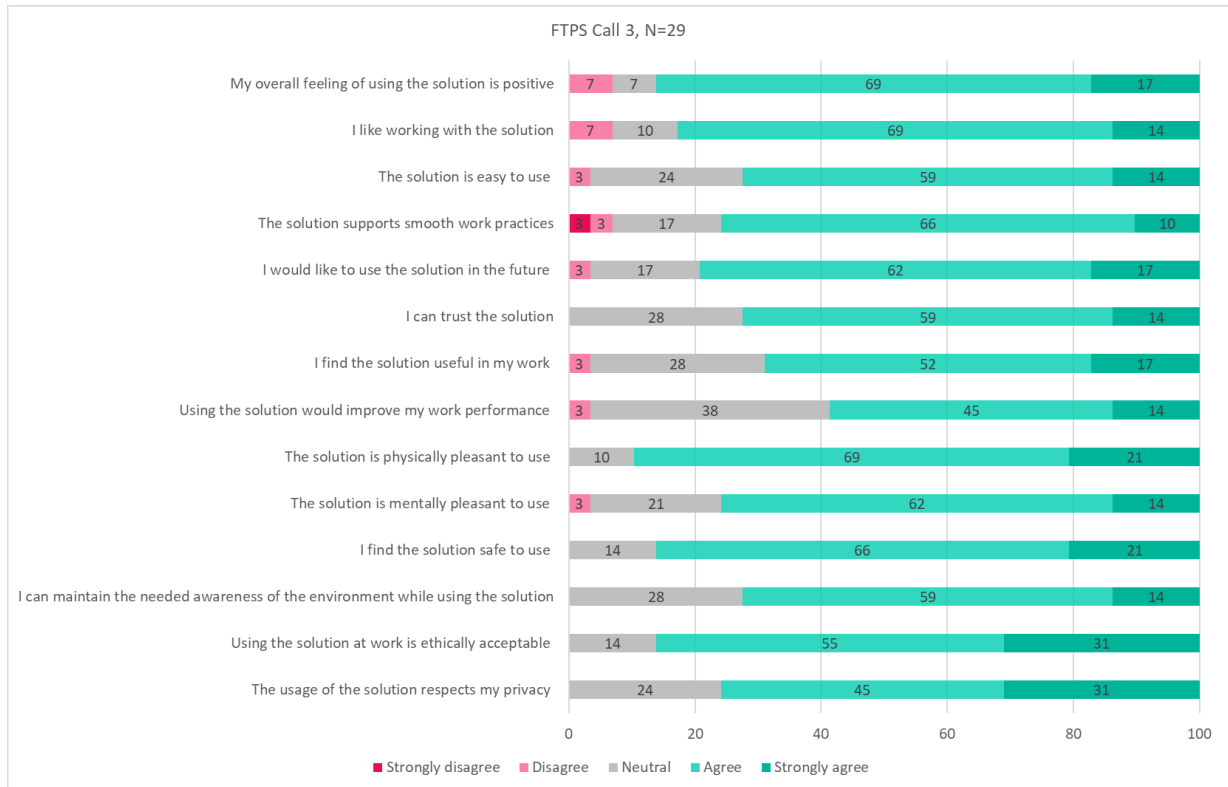


Figure 51. Human factors questionnaire results per question for the Open Call 3.

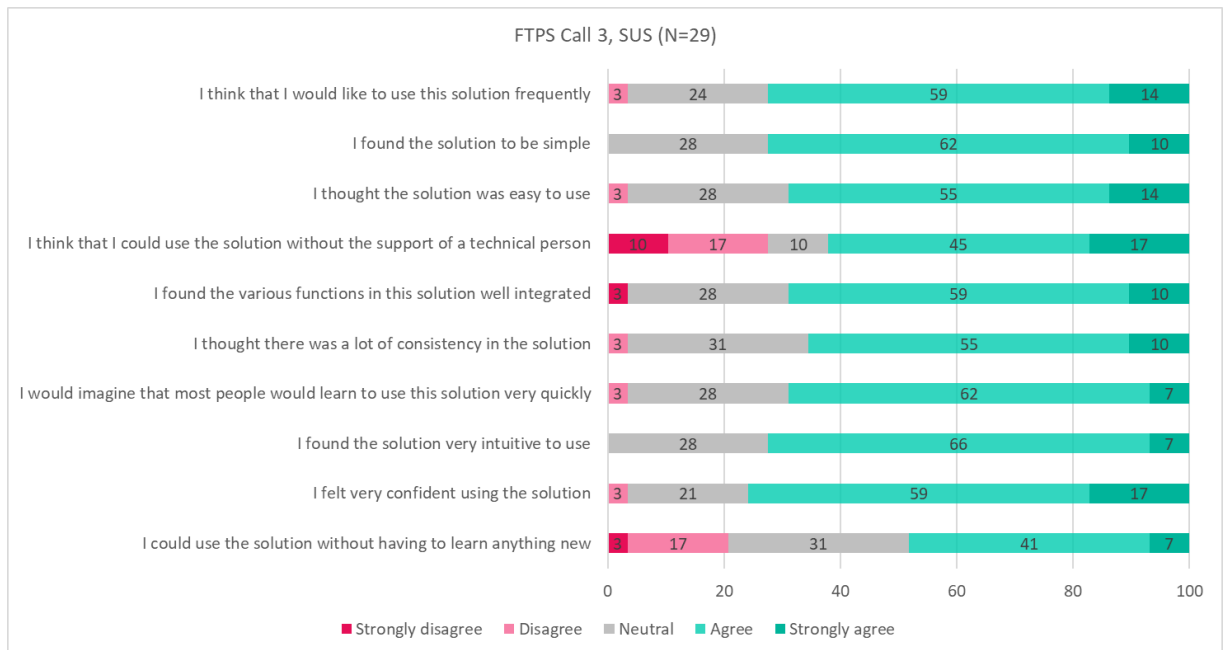


Figure 52. System usability questionnaire results per question for Open Call 3.



# Anexo C: Explicación de la metodología de recogida del valor de referencia de los KPIs

(Abril-Jimenez et al., [2022](#))

Table 7 Times associated to the measure of the T4.5 Wellbeing KPIs (BOSCH)

Task ID	ESTIMATED TIME PERCENTAGE PER SHIFT
1	4,9%
2	3,43%
3	9,8%
<b>TOTAL</b>	<b>18,13%</b>

Task 3 is associated with the check of the manual assembly, the task that the components VQC and AR-CVI carry out when it is in use, so the workload would decrease by 9.8% in each work shift.

Once it is implemented, one more task associated with the use of the AR-CVI and VQC applications will be added to the Table 8 (task 4). But this is estimated to be less than 9,8%.

Table 8 Time load per task associated to the KPI Wellbeing measurement (BOSCH)

Task ID	ESTIMATED TIME PERCENTAGE PER SHIFT
1	4,9%
2	3,43%
3	9,8%
4	X%
<b>TOTAL</b>	<b>8,33% + X%</b>

**T4.6 Safety** Currently the energy load associated with transporting magazines carts from floor 3 to floor 2 accounts for 5.75% per shift of the energy consumption of the person working moving material.

Once the robot is operating autonomously, it is expected to eliminate this percentage of the total.

5.2.2 Use Case 2 Multiple-line material loading by shared autonomous mobile robot baseline values and methodological KPI collection

Table 9 presents the final KPIs for the UC, the definition, and the baseline value. The methodology to obtain this value and how it will be gathered through the introduction of the SHOP4CF components is explained after the table.

Table 9 KPI definition and baseline value (mean value) BOSCH UC2

ID	Category	Requirement specification	KPI definition	Baseline Value
T1.1	Safety and Security	Reduce the stress of the human worker working collaboratively with the robot.	Downtime due to lack of material	13,497%
T2.2	Throughput	Workers can focus on their main tasks in production without taking over additional tasks.	operators number / shift	See methodology
T3.5	Decision making	Efficient utilization of the equipment without compromising automation.	Downtime due to lack of material	
T3.7	Data Traceability	Increase material and process traceability during transport.	Downtime due to lack of material	
T4.4	Acceptance and Usability	Motivation	Downtime due to lack of material	

5.2.2.1 Explanation of the methodology for collecting the KPI baseline value

**T1.1 Safety and security:** The objective of this KPI is to measure the reduction of overload in worker daily routines with the interaction with the robot. Currently, the operators have to perform up to 7 different manual tasks (numbered from 1 to 7 due to confidential aspects) at the station. The estimated time per task is shown in Table 10:

Table 10: Percentage of estimated time per shift/Worker

Task ID	ESTIMATED TIME PERCENTAGE PER SHIFT
1	0,157%
2	0,014%
3	0,030%
4	0,027%
5	0,020%
6	0,002%
7	13,247%
<b>TOTAL</b>	<b>13,497%</b>

In particular, task 3 is the one that the robot will perform within this use case, and it is associated with the loading of empty blisters in the machine infeed, so the workload would decrease by 0.030% in each work shift.

Once it is implemented, one more task associated with the use of the MPMS application and possible actions with the robot will be added to the table (task 8). But this is estimated to be less than 0.030%.

Table 11: Description of the current estimated time that an operator spends per task in the UC machine

Task ID	ESTIMATED TIME PERCENTAGE PER SHIFT
1	0,157%
2	0,014%
3	0,030%
4	0,027%
5	0,020%
6	0,002%
7	13,247%
8	X%
<b>TOTAL</b>	<b>13,467% + X%</b>

**T2.2 Throughput** Workers can focus on their main tasks in production, without taking over additional tasks. The results of the productivity indicators associated with the stations where the use case is developed are shown below. They are separated into two graphs, one for each production line in which the station is located. The value belonging to M1 has been taken as a reference and a record is shown for each month from M1 to M24.

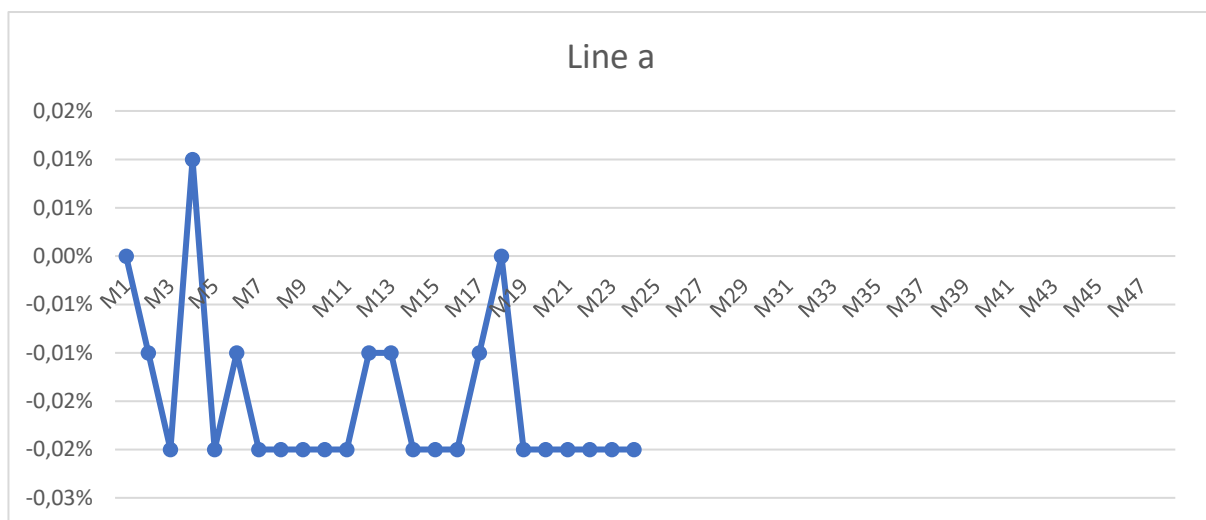


Figure 6 Productivity indicator line 1 (BOSCH)

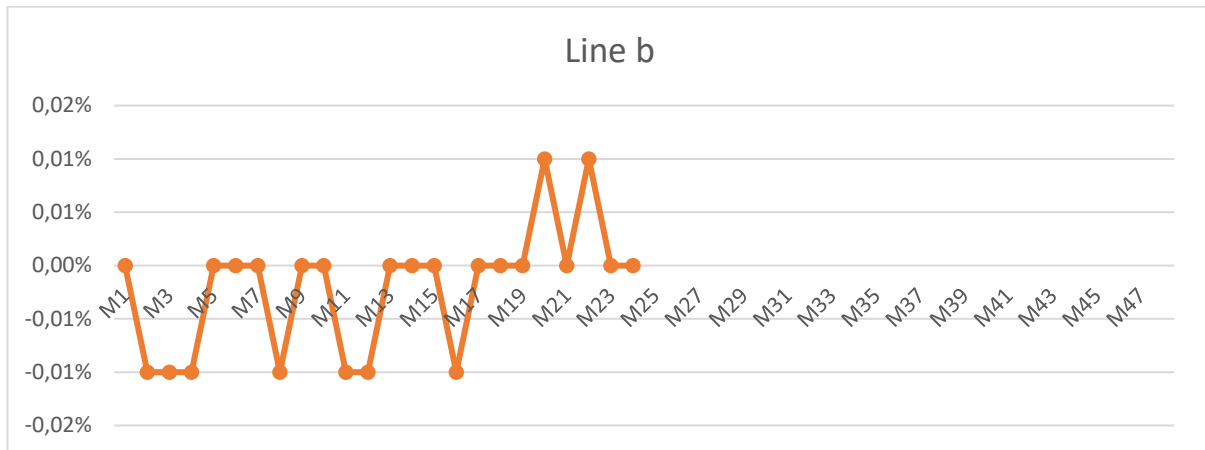


Figure 7 Productivity indicator line 2 (BOSCH)

**T3.5 Decision Maker.** When the pilot is running, we will collect the number of questions or requests from the operators working at the station with the robot per week, so we can see if the autonomy improves between a first data collection at the beginning and at the end of the pilot.

**T3.7 Data Traceability** We have the events recorded by the machines as well as their duration, so we can quantify the number of times a downtime has occurred due to lack of material.

The Table 12 shows the percentage of time spent on machine downtimes compared to the total time spent on all downtimes.

Table 12 Percentage of time spent on machine downtimes compared to the total time spent on all downtimes (BOSCH)

DOWNTIMES	M1:M24	M25:M48
LINE A	34%	
LINE B	4%	

**T4.4 Acceptance and Usability** Fatigue experienced by operators at packaging stations is at 12%, with the arrival of the robot it is expected to be reduced by 3%.

### 5.2.2.2 Problems faced and recommendations

According to the survey done to the developers involved in the integration sessions of BOSCH, the time required to integrate the components in the different UCs is more than 3 days, with an estimated effort of 1 person per component and day. Several unexpected difficulties were found during the integration that require more efforts and time than initially planned.

FIWARE deployment was the main cause of this delay, since the need to deploy the context broker using the internet on a production network, the responsibility of who and how FIWARE should be deployed was not clear. Good knowledge of FIWARE and the database is highlighted as mandatory to have success in the component deployment at BOSCH.

A current open issue is the impossibility to administrate questionnaires to involved workers. That could be a problem at the end of the pilot to gather information with the usability and acceptability questionnaire defined in WP2. Different solutions and discussion are ongoing at the date of delivery of this document with a definitive solution.

## 5.3 Siemens Pilot site

Baseline data was collected during the last quarter of 2021, once the design and manufacturing of the workcell was completed. Once the workcell was completely integrated,

# Anexo D: Despliegue y resultados de los pilotos FSTP

(Abril-Jimenez et al., [2023](#))

## 4 FSTP pilots deployment and results

In addition, in the LSP, the problems addressed by the participants in the open call are very different, and the context conditions of the experiment are totally different from one pilot site to another. Evaluation was planned as flexible as possible in order to adapt to the different needs of the participants. Summary of the problems and KPIs to assess the effectiveness and success of the implementation are shown in this section. After the KPIs were defined, the evaluation team and the open call participants made a mapping process to include the defined KPIs in the same domains followed by the LSP and compare the experiment results in terms of acceptability and impact on the involved industries.

In general terms, the approach followed by the FSTP is totally different to the experiments in the LSP. They are, in most of the cases, small scale pilots, with few or very few operators involving and very specific focus-oriented problems. On contrary to the LSP, integration and interoperability are not the main issues and problems to solve, but the productivity in terms of saving cost and resources, but also in terms of improvement of the workers' working conditions, so that they become more productive. In this sense, human aspects of the digitalization process were also highly addressed with focus on safety and wellbeing.

### 4.1 First open call

#### 4.1.1 General evaluation deployment and results

During this open call a total of five proposal got funded. Details of the open call procedures and proposals are in D8.5. During this open call the number of SHOP4CF components were used or extended as it shown in Table 21: Summary of the experiments of 1<sup>st</sup> open call Table 21

Table 21: Summary of the experiments of 1<sup>st</sup> open call

Experiment	Summary of the problem addressed
ISTSME	Deployment of a real-time data-driven cloud-based system to address quality control and product traceability and an optimized production scheduling by improving resource allocation and delivery time and a paper-free based solution by automated annotation
BUCK	The pilot project BUCK is considering the mental workload as well as the ergonomic workload for workers in intralogistics systems. Three main indicators will be improved, the mean weight carried per day per operator, the distance per day per operator, and the ERGO Mapping indicator (considering the mental load).
PosWeTool	The main objective of this project is to make it easier for the end-user workshop to solve the problem of tool positioning, tool wear and energy consumption of the machine
BrainWatch	The project analyses EEG-based indices of neural processes associated with users' performance for optimized assignment of tasks to workers
MATRESS	Improve intra-factory logistics of contract, lot size one metal fabrication with focus on human factors

Regarding evaluation, the KPIs defined were highly dependent of the needs of the involved SMEs. Table 22 shows a summary of the addressed problems in each of the experiments and the KPIs defined to evaluate the results of the experiment.

Table 22 Summary of 1<sup>st</sup> open call experiments and KPIs rationale

Experiment	Summary of the problem addressed	KPI ID	KPI rationale
ISTSME	Deployment of a real-time data-driven cloud-based system to address quality control and product traceability and an optimized production scheduling by improving resource allocation and delivery time and	IS_KPI1	Improve human-based production planning and worker allocation based on a gradient free scheduling optimization
		IS_KPI2	Increase worker production uptime reducing the produced parts human-based physical counting and report during shift charge over time

	a paper-free based solution by automated annotation	IS_KPI3	Connected 5 workstation from the factory shopfloor to eliminate worker annotation deadtime and production reporting errors, paper-free production real time traceability
BUCK	The pilot project BUCK is considering the mental workload as well as the ergonomic workload for workers in intralogistics systems. Three main indicators will be improved, the mean weight carried per day per operator, the distance per day per operator, and the ERGO Mapping indicator (considering the mental load).	BUC_KPI1	Improve ergonomics of workstations when performing task in collaboration with robots
		BUC_KPI2	Reduction of the musculoskeletal disorders associated to heigh weighs manipulation
		BUC_KPI3	Reduction of the distance of manual pulling of the rolls
PosWeTool	The main objective of this project is to make it easier for the end-user workshop to solve the problem of tool positioning, tool wear and energy consumption of the machine	POS_KPI1	Reduction of downtime of search tools
		POS_KPI2	Tool Life extension
		POS_KPI3	Production time increment
		POS_KPI4	Material cost saving
BrainWatch	The project analyses EEG-based indices of neural processes associated with users' performance for optimized assignment of tasks to workers	BRA_KPI1	Reduction of faulty products
		BRA_KPI2	Increase in productivity
		BRA_KPI3	Increase in workers satisfaction
MATTRESS	Improve intra-factory logistics of contract, lot size one metal fabrication with focus on human factors	MAT_KPI1	Hardware connected communication allowed
		MAT_KPI2	Human comfort increased
		MAT_KPI3	Reduced waste

Table 25 (in Annex) shows the mapping work done of the proposed KPIs following the same domains proposed in the general evaluation framework. Highlight the high number dedicated human factors KPIs (Figure 8). Every of the experiment but one defines at least one KPI related to human factors. Among them Safety with focus on worker, is the more addressed type of KPIs for evaluating the solutions. These KPIs focused on reducing the hard and dangerous working conditions with automation or human robot collaboration.

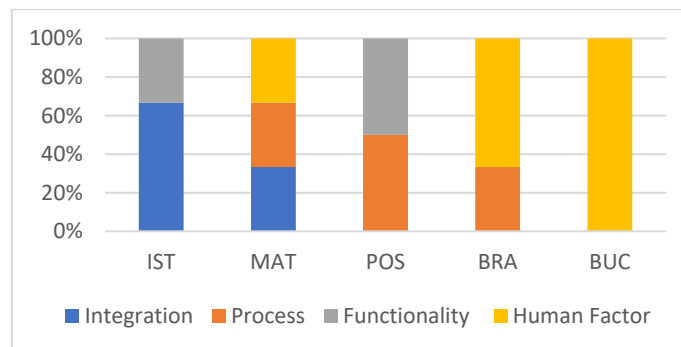


Figure 8 Distribution of KPIs domain per FTSP (1st open call)

The second domain most assessed was process domain (see Figure 9), showing the open callers were highly focused on improving or introducing new aspects into the existing process that allow automation or better data sharing.

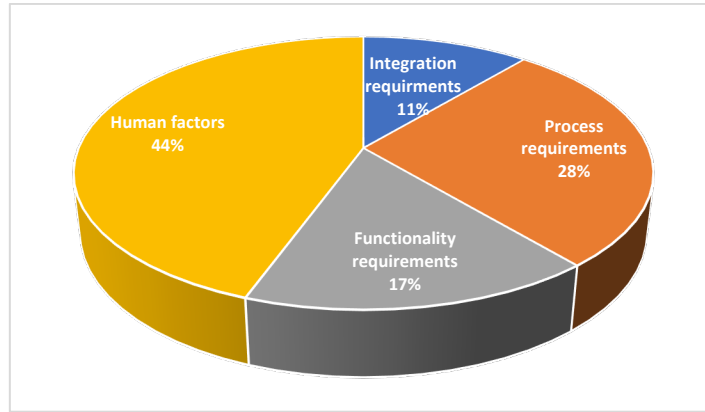


Figure 9: Percentage of defined KPIs per evaluation domain

The human factors assessed is highly relevant in safety related KPIs because of the influence of ergonomic assessment in one of the funded experiments (Figure 10)

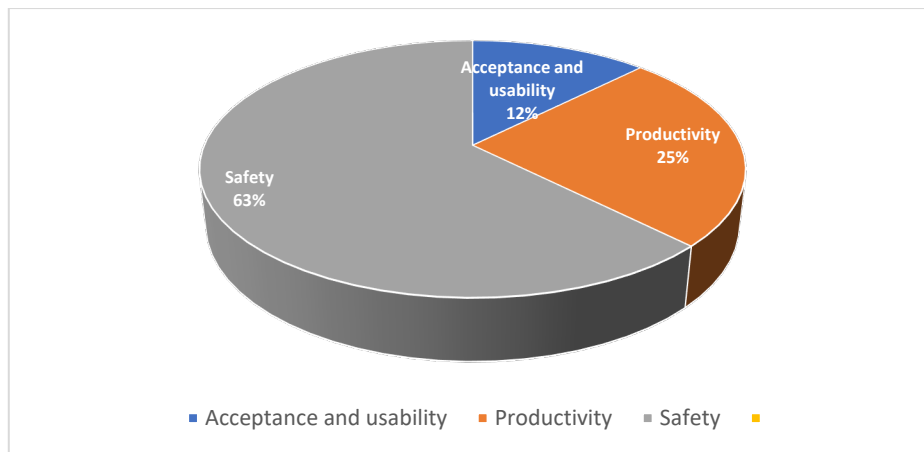


Figure 10 Human factors related KPIs distribution

Every of the experiments has very good results and the proposed KPIs successfully achieve on the conditions of experiment running. Figure 11 demonstrates the percentage over the estimation of the different KPIs suggested by the participant in the open call. Only 2 of the KPIs were not successfully achieved but the causes were related to the implementation and deployment constraints in the term of production lines.



Figure 11 Achievement of the different KPIs over the initial estimation in the Open call 1

#### 4.1.2 Integration experience results

The integration experience of the participants in this first open call was extraordinary relevant for the deployment of RAMP and the documentation for supporting integration of the available components. During these first open call, part of the components was on refinement process and the documentation was not completed in some cases. The mentors collaborated together participants development team to find barriers and to create the necessary measure in the SHOP4CF consortium to overcome the issues.

In this case, as well as in the other open calls, FSTPs has a very short time to get skilled with platform components. In most of the cases, FIWARE previous knowledge was missing or very low. In this sense, as it was expected because the lack of maturity in some components documentation the main problems highlighted were the difficulties to find suitable information about the component deployment and poor documentation. RAMP development status at the time of this open call was also highlighted as a problem. The results and comments of the participants in this open call, gathered by mentors, was very relevant to improve registration, component upload process and navigation of RAMP platform.

At the end of the experiment most of the participants consider the effort to integrate the SHOP4CF is high with an average of 8.2 up 10 points. However, even this effort, participants considered the implementation of new functionalities without SHOP4CF components would be much more difficult with an average of 9,7 points up 10. This is an important added value of the SHOP4CF components for industrial SMEs digitalization, since they have not the resources to implement their own solutions, and even the learning curve of the SHOP4CF process, the results are much easier with SHOP4CF. Some results of this survey are presented in Figure 12. Complete results are included in Annex 3.

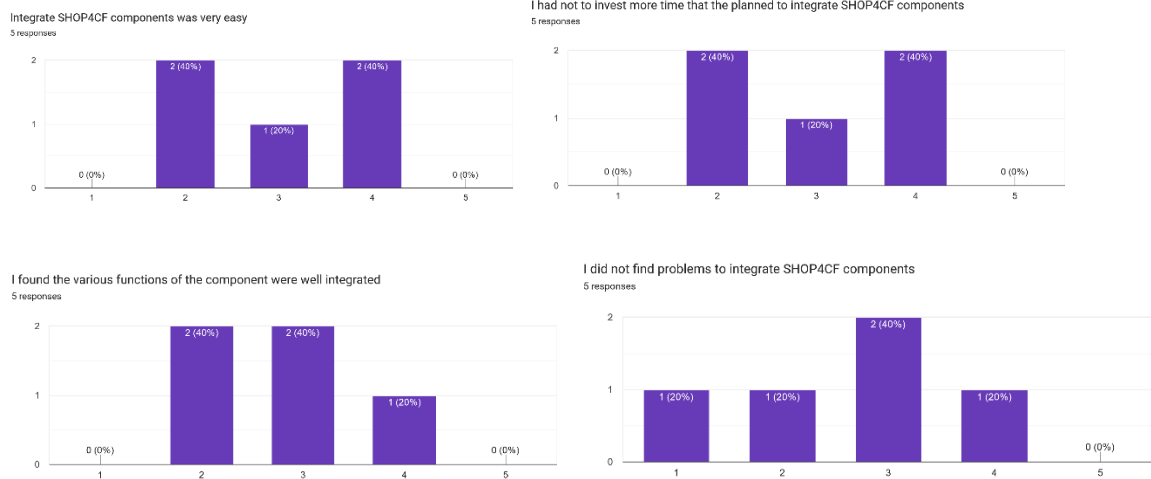


Figure 12 Some examples of the answers to the integration questionnaire in the first open call

In addition, as well as it happened with the first use cases deployed in the LSP, FIWARE deployment was an issue in some of the pilots. Lessons learnt by SHOP4CF team developers was very necessary to solve these issues, especially during the first months of development, to set the FIWARE environment. With this lesson learnt, WP9 in collaboration with mentors and SHOP4CF developers established a tasks force to improve documentation and information access.

Comments of the open callers and responses shown that in a practical way, the issues, and problems they have faced during the experiment deployment and evaluation were not so much different than the ones the SHOP4CF integrators had in the LSP.

#### 4.1.3 Human factors questionnaire

This first call suffered from lack of real workers that participated actively in the evaluation and whom results were collected using the human factors questionnaire developed in WP2. These issues were solved during the following open calls, in which the number of real workers was a mandatory element for the evaluation. Some relevant results are represented in Figure 13.

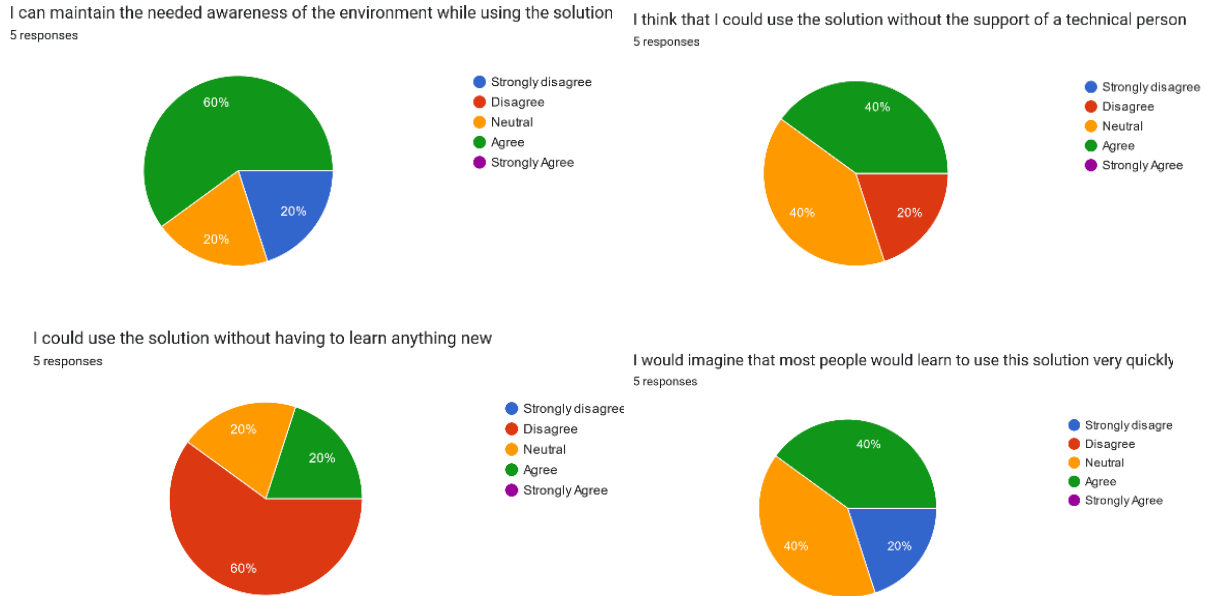


Figure 13 Main results of the human factor questionnaire for the first open call

## 4.2 Second open call

### 4.2.1 General evaluation deployment and results

During this open call a total of 13 proposal got funded (one of them started later and the results have not been included in this analysis). Details of the open call procedures and proposals are in D8.6. During this open call the number of SHOP4CF components were used or extended as it is detailed in the section 4.2.2.

Regarding evaluation, the KPIs defined were highly dependent of the needs of the involved SMEs. Table 23 shows a summary of the addressed problems in each of the experiments and the KPIs defined to evaluate the results of the experiment.

Table 23 Summary of 1<sup>st</sup> open call experiments and KPIs rationale

Experiment	Summary of the problem addressed	KPI ID	KPI rationale
AI4Dim&SurfQ A	The solution aims to improve the manual quality control of two-dimensional cut-parts, using AI vision.	AI4_KPI1	Worker workload based on NASA Task Load index
		AI4_KPI2	Reduction of the time invested in manual and visual inspection of new products
		AI4_KPI3	Accuracy of dimensional defects inspection time (ADT) of the system
		AI4_KPI4	Time spent on the AQ of surface defects
		AI4_KPI5	Intra and inter observer variability of dimensional defects inspection time
Angel	The challenge is aimed at helping humans around palletization workplace with easy and helpful tools rather than replacing humans by new robots.	ANG_KPI2	Angel accuracy and response time to be safety and useful
		ANG_KPI3	Angel integrated and available in RAMP
		ANG_KPI4	Angel final user acceptance
ASMOSA	The experiment addresses reduction of cognitive burden that is expected to be the main relevant human-related issue for workers in Big Industry including developers and administrators as well as workers in logistics, sales, management, etc	ASM_KPI	Solution deployed and available in RAMP
CO-CREW	The main challenge to solve is to enable data collection of process	COC_KPI1	A MQTT client implementation is implemented that support transfer of data to the SHOP4CF platform

	data both from a robot screwdriver tool and a hand-held screwdriver to use manual and robotics screwdriving in combination. Without this integration many companies are reluctant to use robotics screwdrivers because the screw process data is not collected in a common data management platform.	COC_KPI1	Access and configuration of the SHOP4CF platform
		COC_KPI3	SHOP4CF system adapter implementation
		COC_KPI4	Risk Assessment –A risk assessment is conducted using the SHOP4CF component RA: Review Risk assessment
		COC_KPI5	The SHOP4CF use case has successfully been deployed to Danfoss or a relevant environment.
HOPE_FOREMAN	The solution aims at delivering a complete human-centric planning and execution system enhancing workers 'job satisfaction and working conditions and company's production	HOP_KPI1	New components developed
		HOP_KPI2	New components integrated and available in RAMP
		HOP_KPI3	Number of digital working instruction to be used in the PPSHA component
		HOP_KPI4	Overall equipment effectiveness of the robotic workcell
		HOP_KPI5	Percentage of faulty components
		HOP_KPI6	Acceptance of the introduce digital technologies among the shopfloor workers
IN4STATION	It is about supporting a human operator to manage the information and his/hers workstation in an agile manner.	IN4_KPI1	Code coverage
		IN4_KPI2	Open bugs
		IN4_KPI3	Mean count of Incidents reports by workstation
		IN4_KPI4	Satisfaction Index
MARSH	The experiment will use the collection of data from low digital skilled workers through low-cost digital solutions to support workers decision-making.	MAR_KPI1	Manufactured Facilities covered
		MAR_KPI2	Manufactured processes improved
		MAR_KPI3	Worker roles benefitting due to the solution
		MAR_KPI4	Products helped to manufacture
		MAR_KPI5	Productivity improvement
		MAR_KPI6	Involvement of potential end-users and business partners
PROPHET	The PROPHET project aims to develop a visual inspection system able to automatically configure the set of control parameters, learning from the choices made by an expert operator.	PRO_KPI1	Configuration time
		PRO_KPI2	Inspection mistakes
		PRO_KPI3	Productivity
		PRO_KPI4	Reduced number of optimization interactions
RASP	Develop an automated solution to the industrial task of screen printing. The automation is achieved by means of a robotic manipulator equipped with an appropriate gripper for handling light and thin sheets that must be manipulated during the printing process.	RAP_KPI1	Percentage of the time worked compared to time available
		RAP_KPI2	Percentage of parts machined compared to theoretically machinable parts
		RAP_KPI3	Percentage of conforming parts to total parts produced
		RAP_KPI4	OEE Score
		RAP_KPI5	Percentage of time the operator spends on non-repetitive task
		RAP_KPI6	Accuracy of the QVC-SP component
RTL4SHOP	The experiment focuses on bringing visibility to the production floor of job shop and discrete production processes with the goal to enable a decision-making procedure to be set (for various management levels) based on real-time data over the WIP status.	RTL_KPI1	Low-latency communication in under 50ms of the location information between RTLS and FIWARE context broker
		RTL_KPI2	5000 position updates per second
		RTL_KPI3	99% accuracy of positioning within a geofence
		RTL_KPI4	50% reduction in delay in detecting production flow abnormalities
		RTL_KPI5	50% reduction in time spent on the factory floor by the production manager to monitor the progress
SmartPartsDetector	The component will be an AR application leveraging the part detection and identification capability to provide human-centred services to workers of a manufacturing facility.	SPD_KPI1	Train, Evaluate, and verify one DL model to recognise ENGINO plastic parts
		SPD_KPI2	DL model to recognise at least 30 ENGINO parts
		SPD_KPI3	DL model to recognise at least 5 different ENGINO parts in mixed images
		SPD_KPI4	Near to real time responsiveness of the DL model recognition
		SPD_KPI5	Develop one AR user interface for mobile devices
		SPD_KPI6	Near real-time responsiveness of the AR interface
		SPD_KPI7	Successful integration of the software components with FIWARE
		SPD_KPI8	A rating of >4 out of 5 from the workers on the component usage
SMASH		SMA_KPI1	Manufacturing facilities covered
		SMA_KPI2	Manufacturing processes improve

	Create the first smart human oriented traceability platform specialized in Food and Fishing.	SMA_KPI3	Worker roles benefitting from the solution
		SMA_KPI4	Assets traced by the RFID solution
		SMA_KPI5	productivity improvement
		SMA_KPI6	Involvement of potential end-users and business partners
WARNING	Proposes to demonstrate the effectiveness of an Augmented Reality (AR) application to support human operators during the assembly phase using a properly designed AR module	WAR_KPI1	Reducing non-compliant electrical panels
		WAR_KPI2	Digitalize building blocks and assembly instructions to automatically generate guidance for the operators
		WAR_KPI3	Validate the overall solution in the assembly area using different configurations
		WAR_KPI4	"Human" validation of the technology
		WAR_KPI5	The workers should receive the assembly/inspection digital instruction in real-time and perform the assembly operation faster

Every of the experiments has potentially good results and the proposed KPIs successfully achieve on the conditions of experiment running. Table 26 (in the Annex 2) shows the mapping work done of the proposed KPIs following the same domains proposed in the general evaluation framework. Highlight the high number dedicated human factors KPIs. In fact, every of the participants, but one of them, have defined KPIs in the Human factors area (in yellow colour) as it is shown in the Figure 14, however, the wider used KPI in this area is Acceptance and usability (see Figure 15) and the less one is Ethics, with none participants assessing this factor.

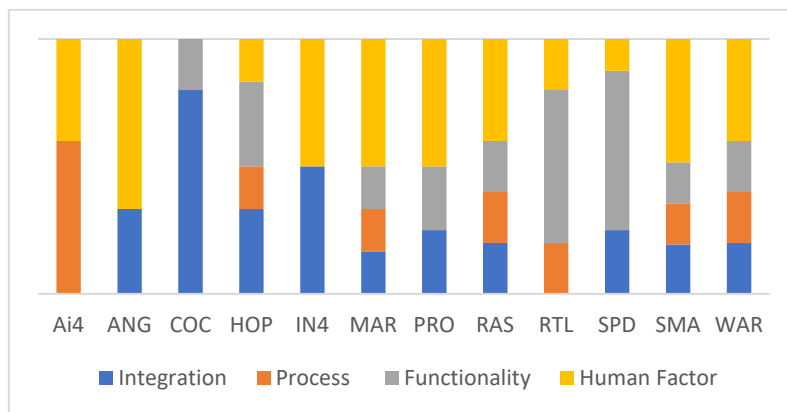


Figure 14 KPIs division per domain in each of the involved experiments in the 2<sup>nd</sup> open call

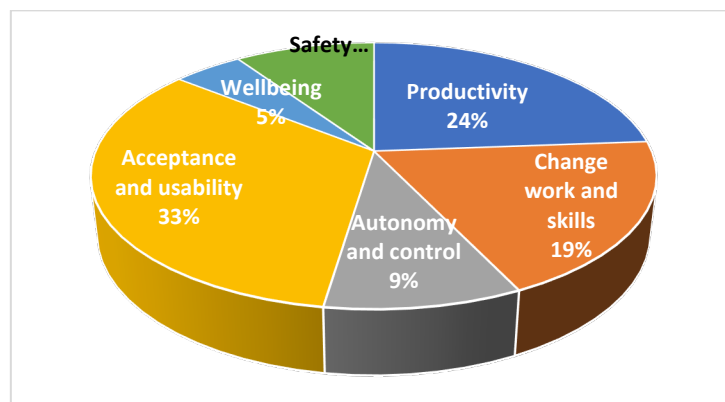


Figure 15 Number experiment addressing the each of the subdomains in the Human factor domain.

If methods to assess this KPI are investigated, most of the instruments try to maximise the acceptance and usability with a focus on increasing productivity and quality of the products, but work wellbeing. We can conclude that the impact of company benefits is still the main cause of digitalisation in this experiment. This could also explain the absence of ethics assessments since the main driver for digitalisation is still the impact on the company but the

wellbeing of the workers. Nevertheless, there is an increasing trend in this second open call to incorporate other human factor related KPIs as target to incorporate workers as active part of the digitalisation process. This is something that we can see in the definition of productivity regarding human process, more oriented to increase productivity because of the reduction of the mental/physical load than the effective hours of work.

The second more assessed domain was functionality (Figure 16).

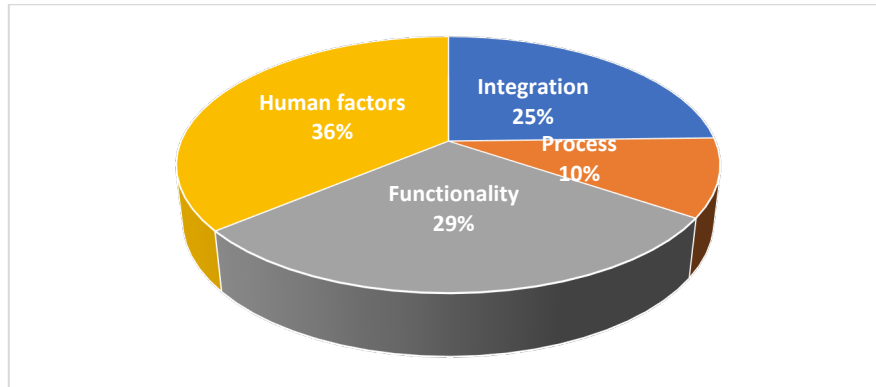


Figure 16 Human factors related KPIs distribution in 2<sup>nd</sup> open call

#### 4.2.2 Integration experience results

Second open call was very extensive in the use of SHOP4CF components. Up to 13 different original components were integrated into 11 of 13 experiments (2 of the experiments did not integrate components but FIWARE and SHOP4CF data model). The most used component in this case was the DCF at it is show in Figure 17.

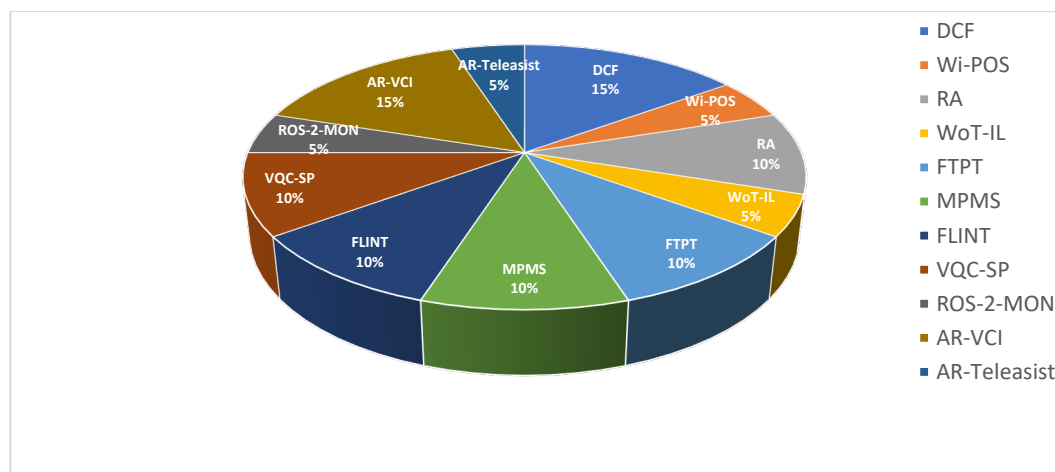


Figure 17 Initial components distribution used by the second open call participants

In addition, 19 new components were developed and tested together with SHOP4CF implementations. These new components were classified in the following RAMP categories (Figure 18).

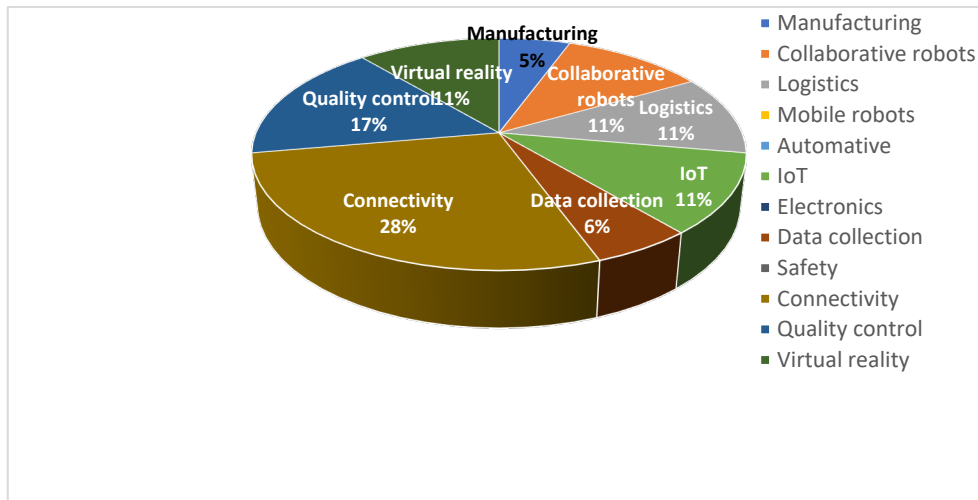


Figure 18 New components distribution according to RAMP categories

SMEs were the main consumer of the SHOP4CF components in this open call (all but 1 participant have integrate the components into a SME) The estimated effort to integrate or extend the functionalities of the components is in average 1 point less of effort (over 10) that without SHOP4CF, but the effort difference is higher when the developer has less knowledge of MES (1 point more of effort using SHOP4CF for those with six or more points of knowledge of MES (over ten) against up 3 points less of effort using SHOP4CF in those that have less of 6 points). In general terms, the participants have a good experience with RAMP and the components, and they have obtained good support during the experiments at it is shown in Figure 19.

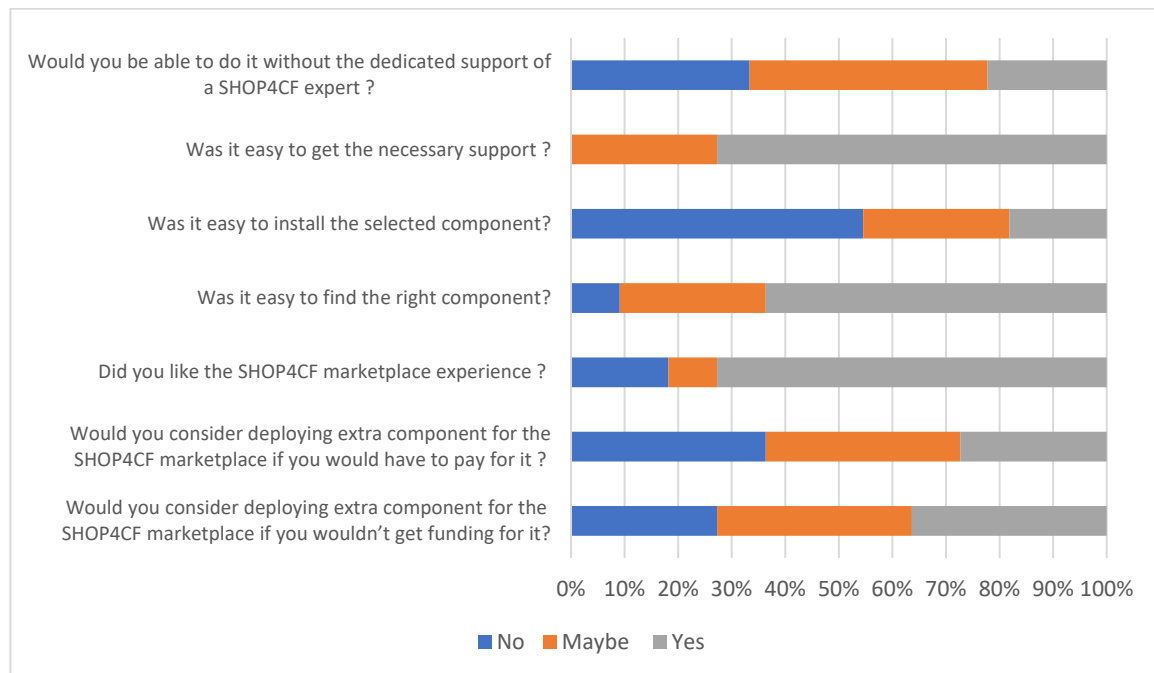


Figure 19 Results of the integrators and developers questionnaire related with the development and integration experience

#### 4.2.3 Human factors questionnaire

The human factors questionnaire was used in the second open call. The questionnaire was responded by 55 participants (male=46 and female=9). The age distribution can be seen from the Figure 20.

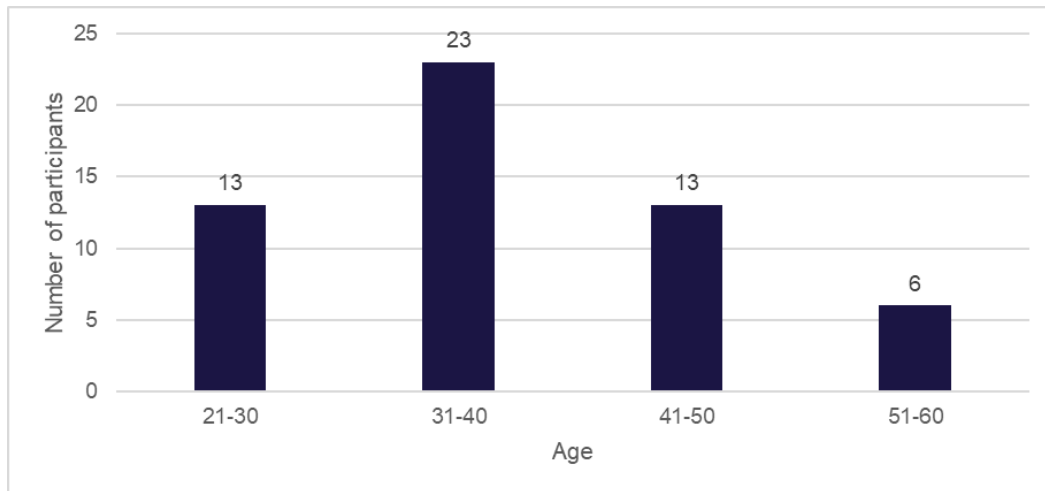


Figure 20. The participants' age distribution (N=55).

In total, twelve different experiments were named when answering to the questionnaire. However, 8 respondents did not answer to this question, and therefore, it is not known which solution they were using. In addition, some of the experiments had low number of test users. For these reasons, the data is analysed as one even though there were several experiments using different solutions. The results give an overview to the second open call rather than a specific solution or experiment. The system usability scale (SUS) score was 73. It means that usability was seen to be good in this open call because the value was above the threshold value 68. Similar good results were gained from the questions related to human factors issues (see Figure 21. More detailed answers can be seen in the Annex.



Figure 21. Human factors questionnaire results for the second Open Call (Scale: 5 = Excellent; very well designed; 4 = Good; nice to use; 3 = Neutral; neither like nor dislike; 2 = Poor; further investigation suggested, consider changes; 1 = Very poor; further investigation needed, changes should be implemented).

Two extra questions were also asked related to the future use of the solutions. Based on the results (Figure 22), participants were not afraid that the solutions would take over their jobs. In addition, they would like to see and try out this kind of technology solutions in the future.

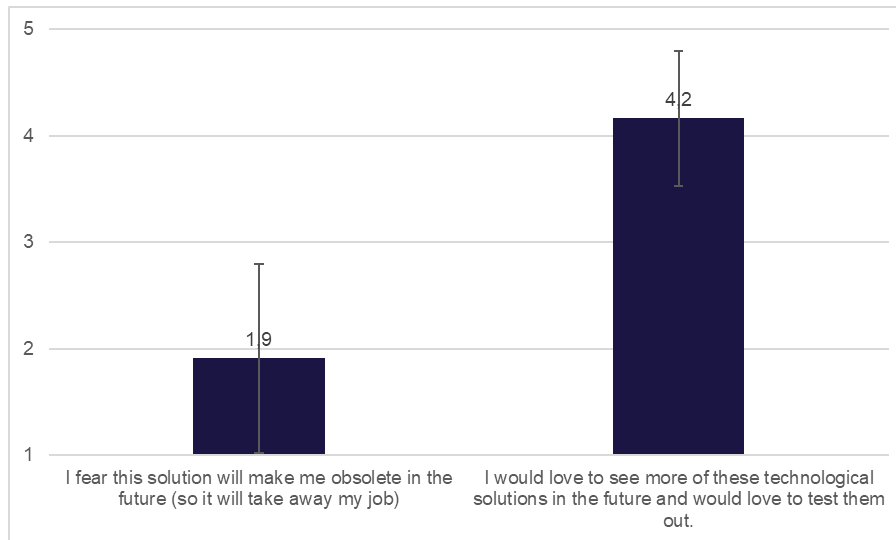


Figure 22. Results from two extra questions (5=strongly agree, 1=strongly disagree).

### 4.3 Third open call

During this open call a total of twelve proposals got funded. Details of the open call procedures and proposals are in D8.7. Regarding evaluation, the KPIs defined were highly dependent of the needs of the involved SMEs. Table 24 shows a summary of the addressed problems in each of the experiments and the KPIs defined to evaluate the results of the experiment.

Table 24 Summary of 1<sup>st</sup> open call experiments and KPIs rationale

Experiment	Summary of the problem addressed	KPI ID	KPI rationale
ALLOTCODA	Aims to demonstrate how to combine a dimensioning app, and a 3D truck loading algorithm to create load plans with higher fill rates and a lower probability of damage	ALL_KPI1	Reduce loading time
		ALL_KPI2	Fill rate
		ALL_KPI3	Measure time reduction
AR2EMP	AR-based quality control applications to audit the worker performance assembly process and provide smart recommendation to minimize or eliminate most common human errors reported.	AR2_KPI3	Performance improvement
		AR2_KPI4	Error minimization
		AR2_KPI5	Inspection time
CHEEPSH	Although many stages of the experiment process are already being controlled by automatism and sensor data there remain other data gaps which impede achieving a digital tracking of the whole value stream.	CHE_KPI1	Worker Satisfaction
		CHE_KPI2	Manufacturing task improvement
		CHE_KPI3	Roles involved
		CHE_KPI4	Human-machine interactions and useful messages
		CHE_KPI5	Productivity improvement (in terms of reduction of ratio of defective production)
COOP	COOP will demonstrate through a significant scenario of the household appliance recycling process, the ability to improve the efficiency of the process through a new proposed collaborative component that will improve human-robot collaboration.	COO_KPI1	Average increase in productivity using the proposed collaborative workstation.
		COO_KPI2	Safety Stops
		COO_KPI3	Overall Equipment effectiveness
		COO_KPI4	Application control rate
		COO_KPI5	Collaboration rate
CUT SHOP	develop a software component for automatic cost, price and lead time	CUT_KPI1	Minimum response delay for quote request
		CUT_KPI2	Laser machining time estimation accuracy
		CUT_KPI3	Total cost estimation accuracy

	estimations of various laser cutting and engraving processes.	CUT_KPI4	Lead time improvement
		CUT_KPI5	Acceptance level
DYNANOMICS	Develops the software architecture necessary for data retrieval, analysis and feedback to reduce the Muskulo Skeletal Risk of operators by providing insight to ergonomic specialists and EHS services.	DYN_KPI1	Frequency of wrong movements detected
		DYN_KPI2	Number of operators monitored
		DYN_KPI3	Volume of motion data collected
		DYN_KPI4	Time spent by EHS to collect data
		DYN_KPI5	Redundancy of data
		DYN_KPI6	Number of warm-ups performed by operators
HARP	To develop a no-code platform to design, construct, and seamlessly deploy highly customized and human-centric Augmented Reality (AR) interfaces for any industrial machine, simply by using a web browser and drag-and-drop functionality.	HAR_KPI1	Decrease of the time required for developing a customized human-centric AR interface
		HAR_KPI2	Decrease of the average time required to train a maintenance technician
		HAR_KPI3	Average cost of development of a customized AR application
		HAR_KPI4	Similarity between the human-centric AR interface constructed on the HARP web constructor and the AR interface experienced
		HAR_KPI5	HARP platform user satisfaction,
MonitorEX	Instrument a remote and real-time monitoring system that consists of a set of commercial and low-cost sensors embedded in the exoskeleton structure, for ergonomics and health monitoring in daily industrial tasks;	MON_KPI1	Data collection
		MON_KPI2	Communication implemented
		MON_KPI3	Ergonomic assessment
		MON_KPI4	Acceptability of the solution
		MON_KPI5	Acceptability of the solution
RTassist	Assistance of manufacturer warehouse employees to deal with their tasks by providing answers to complex questions from a Natural Language Understanding based Real-Time Communications system embedded in an Android application for smartphones.	RTA_KPI2	Manufacturing processes improved
		RTA_KPI3	Worker roles benefitting
		RTA_KPI4	Human-machine interactions and messages
		RTA_KPI5	Productivity improvement
		RTA_KPI6	Involvement of potential end-users and business
SEA WORDS	incorporate an IoT-interoperable mobile natural language based automated communications assistant through Natural Language Understanding (NLU), Data Processing to create the first smart human oriented virtual assistance platform specialized in Smart Ports	SEA_KPI2	Manufacturing processes improved
		SEA_KPI3	Worker roles benefitting
		SEA_KPI4	Human-machine interactions and messages
		SEA_KPI5	Productivity improvement
SISTER	SISTERS brings radical, human-centric revolution to production planning, execution and traceability of contract, variable lot size plastic fabrication.	SIS_KPI3	Number of product specific TUPID models and instructions
		SIS_KPI4	Overall equipment effectiveness (OEE) of the analysed work cells
		SIS_KPI5	Percentage of errors due to breaking the paper trail
		SIS_KPI6	Acceptance of the introduced digital technologies among the shopfloor workers
TRANSPORT	Besides reducing physical strain and freeing up workers' time, workers will also have to adapt to the presence of the ATR2. U	TRA_KPI1	Position and communication
		TRA_KPI2	Localization improvement
		TRA_KPI3	Repeatability
		TRA_KPI4	Reliability Improvement
		TRA_KPI5	Safety distance

Every of the experiments has potentially good results and the proposed KPIs successfully achieve on the conditions of experiment running. Table 25 (in Annex 2) shows the mapping work done of the proposed KPIs following the same domains proposed in the general evaluation framework. Highlight the high number dedicated human factors KPIs.

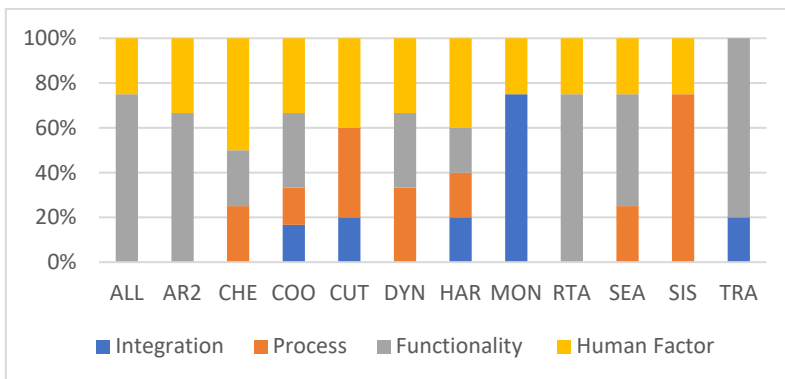


Figure 23 KPIs division per domain in each of the involved experiments in the 3<sup>rd</sup> open call

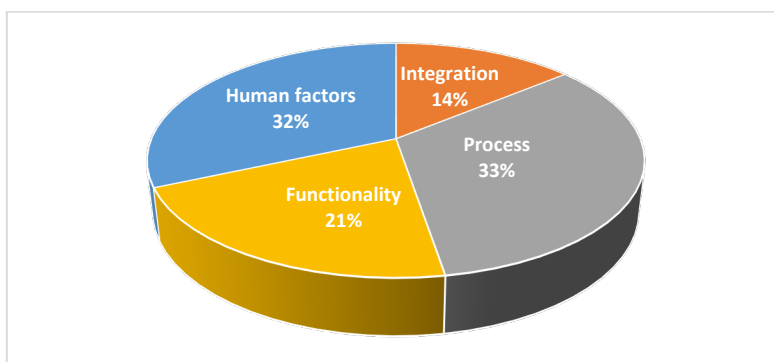


Figure 24 Number experiment addressing the each of the subdomains in the Human factor domain.

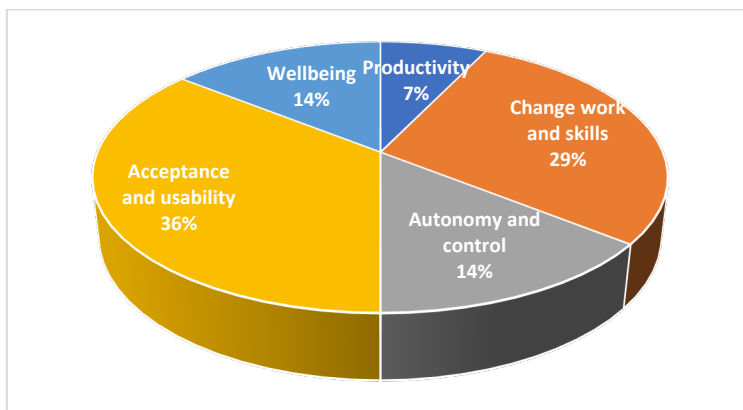


Figure 25 Number experiment addressing the each of the subdomains in the Human factor domain.

#### 4.3.1 Integration experience results

A total of 10 different SHOP4CF components were integrated into the experiments. The most used component (per number of different experiments in which it was used) was FLINT (Figure 26). One of the experiments did not use additional SHOP4CF components, but only use FIWARE and SHOP4CF data model to create new components to be deployed into RAMP platform.

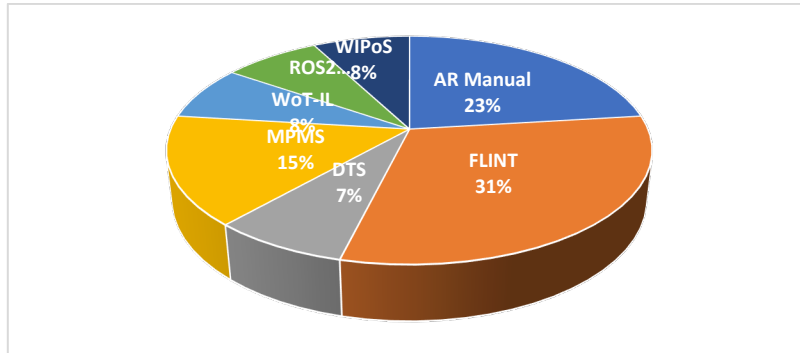


Figure 26 Distribution of the usage of the initial components available in RAMP

A total of 11 open callers from the 12 funded ones were created new components to be uploaded into RAMP platform. A total of 19 new components were implemented. Figure 27 shows the classification of the new components according to basic RAMP classification filters.

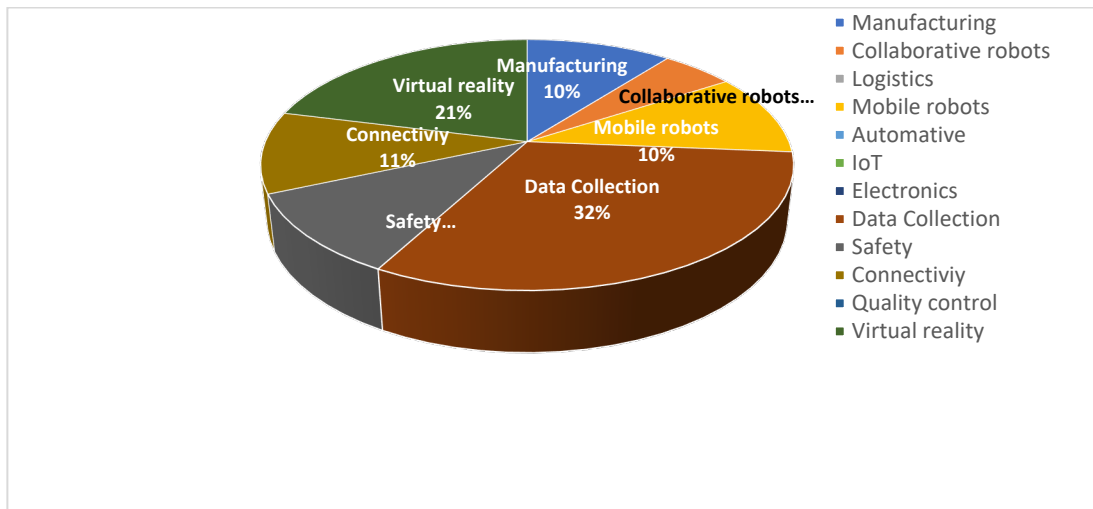


Figure 27 Categorization of the new components developed under the 3<sup>rd</sup> open call in RAMP

The estimated effort of integration of the SHOP4CF components was in average  $7,54 \pm 1,71$  while the estimated effort of implementing the same solution without SHOP4CF was in average  $7,92 \pm 1,85$ . All the participants (integrators and developers) considered that all their required functionalities are covered by the selected components and no missing needs were identified. In general terms, the participants have a good experience with RAMP and the components, and they have obtained good support during the experiments at it is shown in Figure 28.

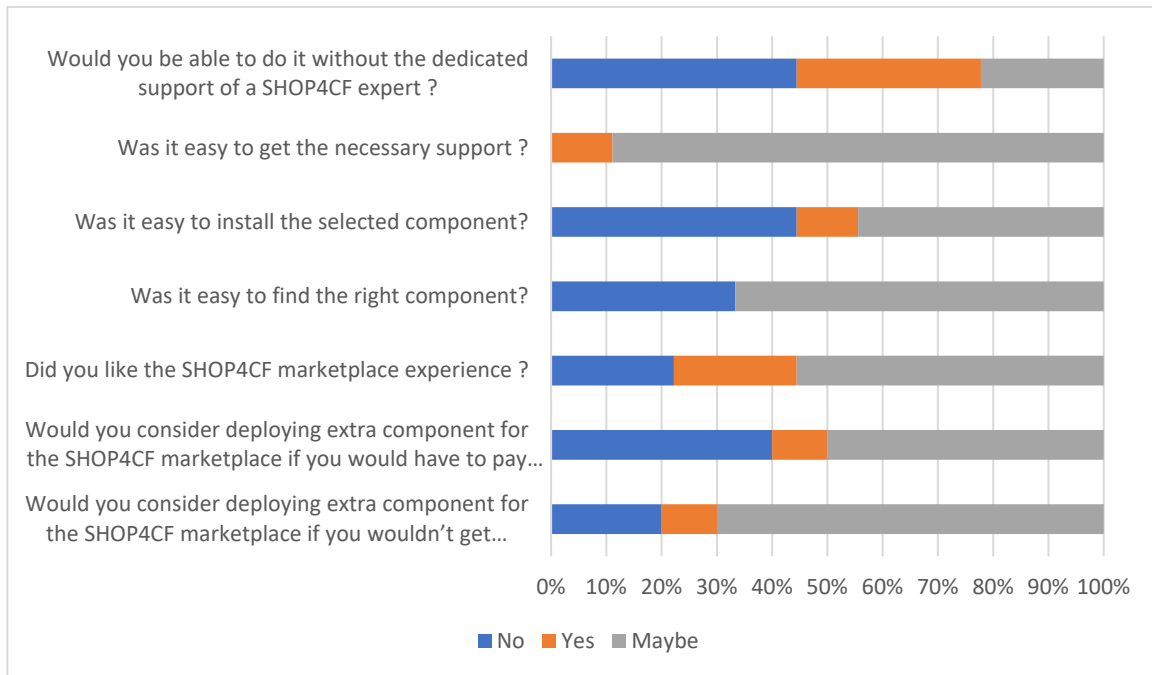


Figure 28 Results of the integrators and developers questionnaire related with the development and integration experience

#### 4.3.2 Human factors questionnaire

The human factors questionnaire was used in all twelve third open call participant companies. However, at the time of the deliver this document, the final result of 6 of them are missing due to extra time was required (AR2EMP, CHEEPSH, CUTSHOP, Dynanomics, SeaWords and SISTERS). The questionnaire was responded by 29 participants (male=22, female=6 and one prefer not to say). The age distribution can be seen from the Figure 20.

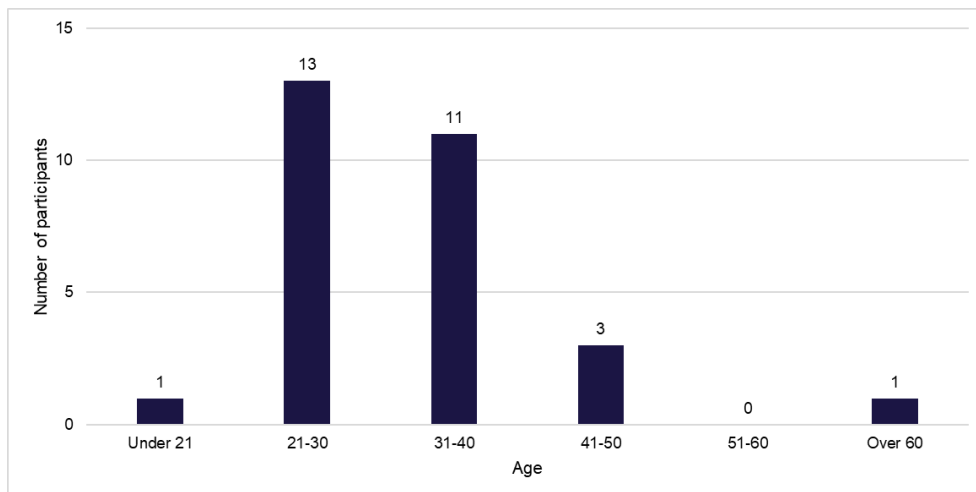


Figure 29. The participants' age distribution (N=29).

The data collected from different open call companies was analysed as one data set even though there were several experiments using different solutions. The results give an overview to the third open call rather than a specific solution or experiment. The system usability scale (SUS) score was 68. It means that usability was seen to be good in this open call. Similar good results were gained from the questions related to human factors issues (see Figure 21). More detailed answers can be seen in the Annex.



Figure 30. Human factors questionnaire results for the second Open Call (Scale: 5 = Excellent; very well designed; 4 = Good; nice to use; 3 = Neutral; neither like nor dislike; 2 = Poor; further investigation suggested, consider changes; 1 = Very poor; further investigation needed, changes should be implemented).

Two extra questions were also asked related to the future use of the solutions. Based on the results (Figure 22), participants were not afraid that the solutions would take over their jobs. In addition, they would like to see and try out this kind of technology solutions in the future.

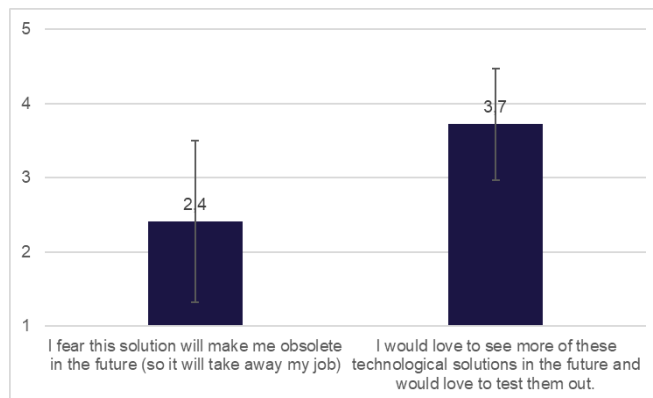


Figure 31. Results from two extra questions (5=strongly agree, 1=strongly disagree).

#### 4.4 The use of the SHOP4CF components

The sustainability of the SHOP4CF depends on the community participation in the maintenance and incremental development of new functionalities based on the proposed components. The following figure analyse the different components usage evolution during the lifecycle of the project.

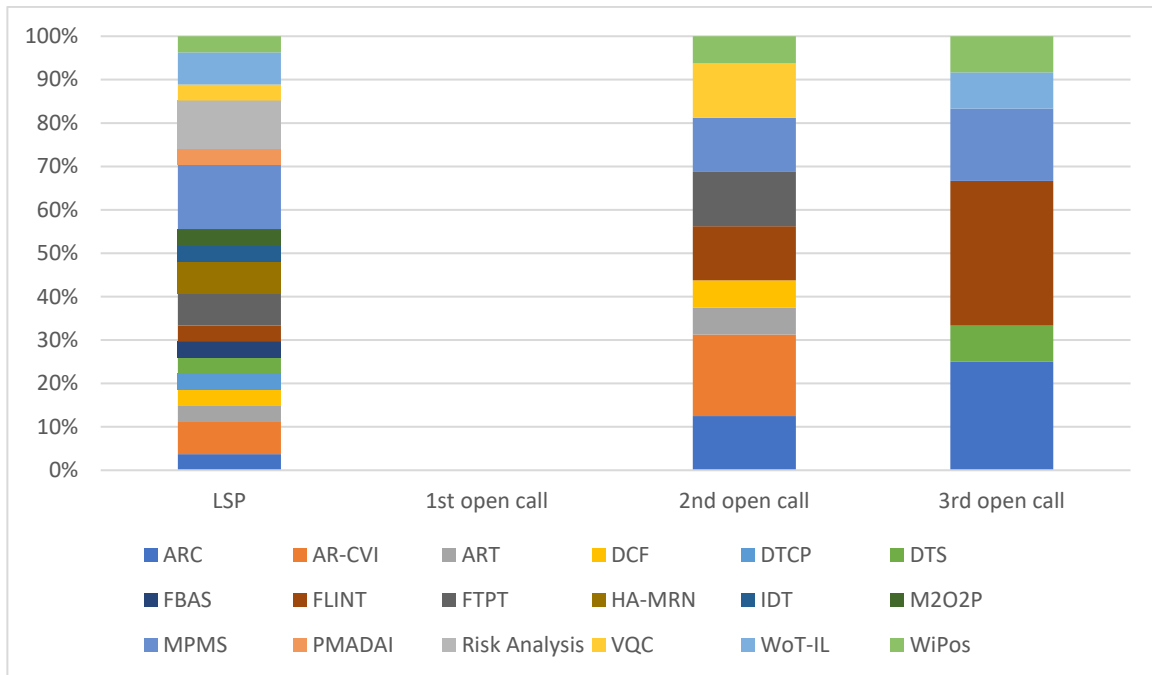


Figure 32 Representation of the components used in the different open calls and the LSPs

#### 4.5 How have the different open callers addressed the Human factors?

Human factors are at the core of SHOP4CF, and post-pandemic industry scenario has reinforced the need to empower worker towards a more proactive role in the workplace. In this scenario, workers and automation technologies become co-workers in a highly digitalized environment. Every of the participants has to design their use cases taking into account human factors implications of their solutions; however, how these factors are incorporated and validated varies from one to another. A detailed description of these factors per participant is out of the scope of this analysis, more focused on analysing the impact of open calls in the SHOP4CF life cycle. Because of that, a comparison between how the evaluation was focused on the different open calls was presented in order to describe the evaluation synergies between the consortium and FTSPs.

Between a 60% in the first open call to a 90% in the second and third open calls have specifically evaluated human factors related KPIs, with a range of importance around 35% of the total of the KPIs in average, at it is shown in Figure 33.

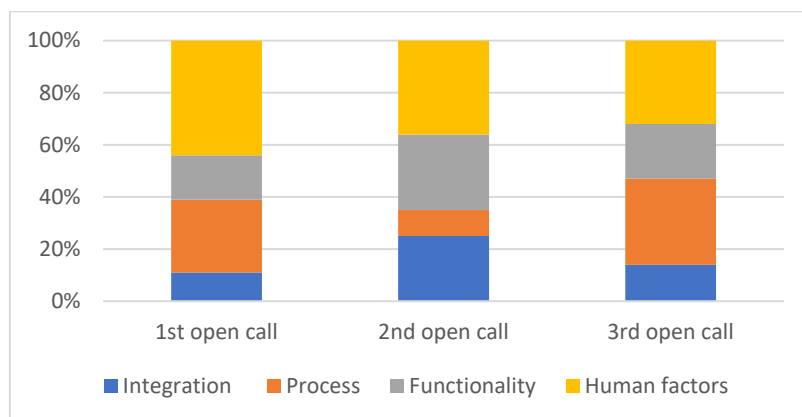


Figure 33 Type of KPI domains evaluated in the different open calls

However, if the subdomain of human factors is analysed in detail for the different open calls, the higher assessed subdomain is acceptance and usability, that it is a very important factor to favour the engagement of the worker in the digitalization process but are less important in terms of active role in the process that others such as autonomy and control and change work and skills.

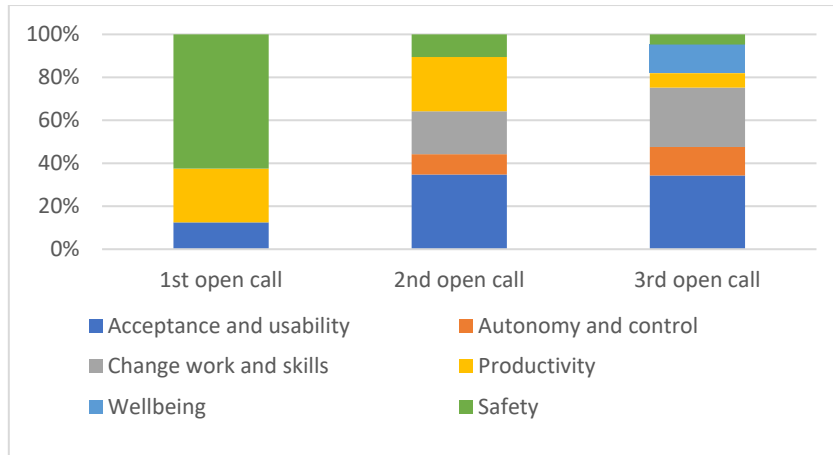


Figure 34 Detail of the different subcategories of Human factors domains evaluated at the three open calls

The higher importance of human factors is also represented in the main domains addressed in the different open calls, as shown in Figure 35.

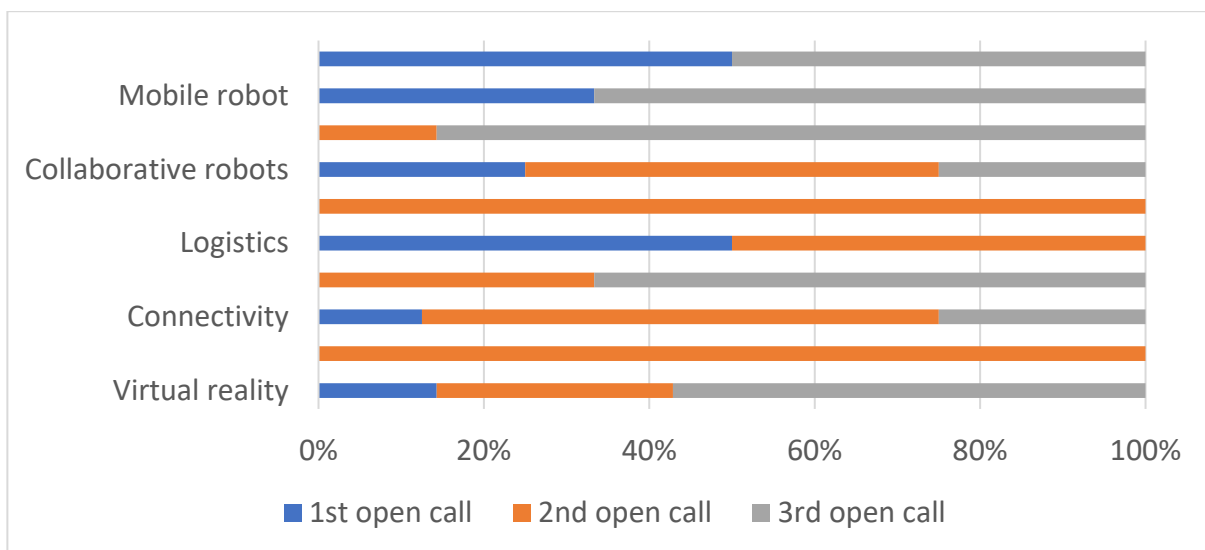


Figure 35 New developed components classified per categories and open callMi