

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES**



**Arquitecturas para el Diseño de  
Sistemas Basados en Digital Twin  
Inmersivos Aplicados al Monitoreo y  
Control de Procesos Industriales**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Gustavo Javier Caiza Guanochanga**

Magister en Sistemas de Control y Automatización Industrial

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

**Doctorado en Automática y Robótica**

**Arquitecturas para el Diseño de  
Sistemas Basados en Digital Twin  
Inmersivos Aplicados al Monitoreo y  
Control de Procesos Industriales**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Gustavo Javier Caiza Guanochanga**

Magister en Sistemas de Control y Automatización Industrial

Bajo la dirección de:  
Dr. Ricardo Sanz Bravo

Madrid, 2024

Título: Arquitecturas para el Diseño de Sistemas Basados en Digital Twin  
Inmersivos Aplicados al Monitoreo y Control de Procesos Industriales.

Autor: Gustavo Javier Caiza Guanochanga

Programa de Doctorado: Automática y Robótica

Dirección de tesis:

Dr. Ricardo Sanz Bravo, Profesor Titular, Universidad Politécnica de  
Madrid, (Director)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

## *Dedicatoria*

*El presente trabajo va dedicado a mis padres (Gonzalo y Consuelo), hermanos (Mauricio y Jhonatan) y sobrino (Christopher), gracias por estar en todo momento y ser un apoyo incondicional en todas las etapas de mi formación académica.*

## **Agradecimientos**

A la Universidad Politécnica de Madrid y a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales por permitirme ser parte del Doctorado en Automática y Robótica.

Un agradecimiento especial para el Profesor. Ricardo Sanz. PhD, tutor de la tesis, quien con su apoyo y tiempo brindado hizo posible que el trabajo vaya saliendo adelante y pueda ser finalizado.

# Abreviaturas y Acrónimos

3D – Three Dimensional

AMQP – Advanced Message Queuing Protocol

AI – Artificial Intelligence

AR – Augmented Reality

CDT – Cognitive Digital Twin

COM – Component Object Model

CP Lab – Cyber-Physical Laboratory

CP Factory – Cyber-Physical Factory

CPS – Cyber-Physical System

CT – Cyber Twin

DB – Data Block

DCOM – Distributed Component Object Model

DT – Digital Twin

DTaaS – Digital Twin as a Service

ERP – Enterprise Resource Planning

EL – Ensemble Learning

FB – Function Block

HMI – Human-Machine Interface

HRC – Human-Robot Collaboration

HTTP – Hypertext Transfer Protocol

ID – Identification

I4.0 – Industry 4.0

ICPS – Industrial Cyber-Physical System

ICT – Information and Communication Technology

iOS – iPhone OS

IoT – Internet of Things

IIoT – Industrial Internet of Things

IP – Internet Protocol

ISO – International Organization for Standardization

IT – Information Technology

MAC – Media Access Control

M2M – Machine to Machine

MES – Manufacturing Execution System

ML – Machine Learning

MPS – Modular Production System

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport

MR – Mixed Reality

OB – Organization Block

OPC UA – Open Platform Communication—Unified Architecture

OT – Operational Technology

PLC – Programmable Logic Controller

RAMI 4.0 – Reference Architecture Model Industrie 4.0

SDK – Software Development Kit

SOA – Service Oriented Architecture

STL – STereoLithography

TCP/IP – Transmission Control Protocol/Internet Protocol

URL – Uniform Resource Locator

VR – Virtual Reality

# Summary

Manufacturing systems are facing a new revolution driven by the digitization of assets, processes, and computing capabilities imposed by new data-driven digital architectures. This represents a transformative shift towards digitization, automation, and connectivity, aiming to create highly efficient and flexible production systems, qualified to adapt to the current and dynamic market demands. Among the enabling technologies of Industry 4.0, the Digital Twin is considered the one leading the way for cyber-physical integration, as the 'cyber' side of CPSs (Cyber-Physical Systems) is often the hosting environment for the DT. The Digital Twin is defined as a digital replica of a physical system that has bidirectional communication and constantly exchanges information between the physical and virtual entities.

For architecture design, it is important to rely on established standards to provide a comprehensive framework for the design, management, and evaluation of the Digital Twin. For these reasons, this research considered the ISO/IEC/IEEE 42010, 42020, 42030, and ISO 23247 standards. These standards specify the fundamental requirements of all the elements that comprise the physical and virtual entities, the guidelines for managing the architecture through a reference model, the requirements for an architecture evaluation framework, and the standardization of a framework to support the creation of the DT in manufacturing applications.

This research proposes the implementation of an architecture for the design of an immersive Digital Twin-based system applied to the monitoring and control of industrial processes. The design of the proposed architecture is based on ISO standards and incorporates the integration of technologies such as Cyber-Physical Systems, Manufacturing Execution Systems, Robotics, the Internet of Things, Augmented Reality, Virtual Reality, and communication protocols like MQTT and OPC UA, to enhance the functionalities of the DT and provide greater capabilities. The proposed work was implemented in an Industry 4.0 laboratory composed of Festo CP-Lab and CP-Factory stations. The following requirements were considered for the implementation of the DT design: (1) observable attributes, 3D design, and visualization of all physical production lines at all stages, (2) a communication entity through flexible and robust protocols for collecting state changes of physical and virtual entities, (3) a DT entity where digital models are

modeled and updated based on collected data, and (4) user entities through the integration of enabling technologies.

The experimental results obtained showed that the immersive DT represents a novel technological paradigm that introduces innovative approaches to improve monitoring, control, decision-making, and efficient management throughout the production cycle. Thanks to these characteristics, the precision and efficiency of manufacturing can be improved based on high-fidelity real-time simulation, converting all available information into knowledge and closing the cyber-physical system loop, making the DT vital to achieving smart manufacturing. Additionally, the proposed architecture, together with the use of industrial protocols, allows the exchange of information between models as well as physical and virtual addresses, integrating the real context of measurement equipment and simulated data analysis. This achieves an improvement in operational efficiency and optimization of manufacturing operation procedures through continuous monitoring, interoperability, and error diagnosis throughout the entire production line, achieved by synchronizing physical and virtual environments.

# Resumen

Los sistemas de fabricación se enfrentan a una nueva revolución basada en la digitalización de activos, procesos y capacidades informáticas impuestas por las nuevas arquitecturas digitales basadas en datos. Esto representa un cambio transformador hacia la digitalización, la automatización y la conectividad, con el objetivo de crear sistemas de producción altamente eficientes y flexibles, calificados para adaptarse a las demandas actuales y dinámicas del mercado. Entre las tecnologías habilitadoras de la industria 4.0 se considera que el Digital Twin es el que marca el camino para la integración ciberfísica, debido a que el lado “cibernético” de los CPS suele ser el entorno de alojamiento del DT, que se define como una réplica digital de un sistema físico que tiene comunicación bidireccional e intercambia constantemente información entre las entidades físicas y virtuales.

Para el diseño de arquitecturas es importante basarse en estándares establecidos para proporcionar un marco completo para el diseño, gestión y evaluación del Digital Twin. Por estos motivos en la presente investigación se consideraron los estándares ISO/IEC/IEEE 42010, 42020, 42030 e ISO 23247. Los cuales especifican los requisitos fundamentales de todos los elementos que componen las entidades físicas y virtuales, las pautas para la gestión de la arquitectura mediante un modelo de referencia, los requisitos sobre un marco de evaluación de arquitectura, y la estandarización de un marco para respaldar la creación del DT en aplicaciones de fabricación.

La presente investigación propone la implementación de una arquitectura para el diseño de un sistema basado en Digital Twin inmersivo aplicado al monitoreo y control de procesos industriales. Para el diseño de la arquitectura propuesta se basó en las normas ISO y se realizó la integración de tecnologías como: Sistemas ciberfísicos, Sistemas de Ejecución de Manufactura, Robótica, Internet de las Cosas, Realidad Aumentada, Realidad Virtual y protocolos de comunicación MQTT y OPC UA, con el objetivo de potenciar las funcionalidades del DT y brindar mayores prestaciones. El trabajo propuesto se implementó en un laboratorio de industria 4.0 que está compuesto por las estaciones Festo CP-Lab y CP-Factory. Para la implementación de la arquitectura se consideró los siguientes requerimientos para el diseño del DT, (1) atributos observables, diseño 3D y visualización de todas las líneas de producción físicas en todas sus etapas, (2) entidad de comunicación a través de protocolos flexibles y robustos para la

recopilación de cambios de estado de las entidades físicas y virtuales, (3) entidad del DT donde se modela y actualiza los modelos digitales en función de los datos recopilados, y (4) entidades de usuario mediante la integración de tecnologías habilitadoras.

Los resultados experimentales obtenidos mostraron que el DT inmersivo representa un paradigma tecnológico novedoso que introduce enfoques innovadores para mejorar los procesos de monitoreo, control, toma de decisiones y gestión eficiente durante todo el ciclo de producción. Gracias a estas características se puede mejorar la precisión y eficiencia de la fabricación basándose en simulación de alta fidelidad en tiempo real, convirtiendo toda la información disponible en conocimiento y cerrando el ciclo del sistema ciberfísico por lo que el DT es vital para lograr la fabricación inteligente. Además, la arquitectura propuesta en conjunto con el uso de protocolos industriales permiten el intercambio de información tanto de modelos como de direcciones físicas y virtuales integrando el contexto real de los equipos de medición y el análisis de datos simulados, logrando una mejora en la eficiencia operativa y optimización de los procedimientos de operación de fabricación a través del monitoreo continuo, la interoperabilidad, y diagnóstico de errores durante toda la línea de producción, esto se logra mediante la sincronización de los entornos físicos y virtuales.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación .....	1
1.2. Industria 4.0.....	8
1.3. OPC UA.....	13
1.4. Sistemas Ciberfísicos .....	15
1.5. Internet de las Cosas .....	18
1.6. Digital Twin.....	19
1.6.1. Clasificación de los DT .....	21
1.6.2. Investigaciones del Digital Twin en el sector industrial.....	22
1.7. Norma ISO 23247 .....	25
1.8. Norma ISO / IEC / IEEE - 42010 & IEEE – 42020 .....	26
1.8.1. Norma IEEE 42010 .....	27
1.8.2. Norma IEEE 42020 .....	27
1.9. Entornos inmersivos .....	28
1.10. Objetivos .....	32
1.11. Hipótesis .....	32
<b>2. Metodología</b>	<b>34</b>
<b>3. Publicaciones</b>	<b>37</b>
3.1. Digital Twin to Control and Monitor an Industrial Cyber-Physical Environment Supported by Augmented Reality. ....	37
3.1.1. Introducción “publicación (1)” .....	39
3.1.2. Trabajos Previos “publicación (1)” .....	42
3.1.3. Materiales y Métodos “publicación (1)” .....	44
3.1.4. Implementación y Resultados “publicación (1)” .....	47
3.1.5. Discusión “publicación (1)” .....	52
3.1.6. Conclusiones “publicación (1)” .....	54
3.1.7. Referencias “publicación (1)” .....	55
3.2. Immersive Digital Twin under ISO 23247 Applied to Flexible Manufacturing Processes. ....	55
3.2.1. Introducción “publicación (2)” .....	56
3.2.2. Trabajos previos “publicación (2)” .....	58
3.2.3. Materiales y Métodos “publicación (2)” .....	62
3.2.4. Implementación “publicación (2)” .....	66
3.2.5. Resultados y Discusión “publicación (2)” .....	73

3.2.6.	Conclusiones “publicación (2)” .....	81
3.2.7.	Referencias “publicación (2)” .....	82
3.3.	An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes.....	82
3.3.1.	Introducción “publicación (3)” .....	83
3.3.2.	Trabajos Previos “publicación (3)” .....	85
3.3.3.	Metodología “publicación (3)” .....	93
3.3.4.	Resultados “publicación (3)” .....	100
3.3.5.	Discusión “publicación (3)” .....	106
3.3.6.	Conclusiones “publicación (3)” .....	109
3.3.7.	Referencias “publicación (3)” .....	109
<b>4.</b>	<b>Discusión</b> .....	<b>110</b>
4.1.	Descripción integrada de la solución .....	115
4.2.	Análisis de resultados .....	116
4.3.	Conclusiones.....	121
4.4.	Futuras líneas de investigación .....	122
	<b>Referencias</b> .....	<b>124</b>
	<b>Anexos</b> .....	<b>130</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Principales tecnologías habilitadoras de la industria 4.0. ....	9
Figura 1.2 Transformación digital con OPC UA [24]. ....	14
Figura 1.3 Componentes principales de un sistema ciberfísico. ....	15
Figura 1.4 Etapas generales de la tecnología Digital Twin [32]. ....	20
Figura 1.5 Entornos inmersivos, Realidad Virtual y Realidad Aumentada ....	29
Figura 3.1 Métodos y tecnologías clave del Digital Twin. ....	45
Figura 3.2 Esquema general del Digital Twin. ....	47
Figura 3.3 Diagrama de clases de la etapa de comunicación. ....	48
Figura 3.4 (a) Configuración del TIA portal; (b) Unidad de comunicación y el sistema integrado. ....	49
Figura 3.5 Implementación del Digital Twin. ....	49
Figura 3.6 Resultados del estudio de operación y operatividad. ....	51
Figura 3.7 (a) Entorno físico y virtual; (b) Entorno virtual con Realidad Aumentada. ....	52
Figura 3.8 Tiempo de comunicación entre el entorno físico y virtual. ....	52
Figura 3.9 Oportunidades y desafíos del Digital Twin. ....	53
Figura 3.10 El marco del Digital Twin para la fabricación bajo ISO 23247 [34]. ....	63
Figura 3.11 Esquema general de la metodología propuesta. ....	64
Figura 3.12 Arquitectura de desarrollo de sistemas Digital Twin inmersivos. ....	65
Figura 3.13 Diagrama UML de la configuración del Senso Glove. ....	68
Figura 3.14 Calibración de la rotación alrededor de los ejes ROLL, PITCH y YAW. ....	70
Figura 3.15 Diagrama UML de la configuración para los entornos de gafas Meta 2. ....	71
Figura 3.16 Configuración de la tarjeta “Particle Photon” ....	72
Figura 3.17 (a) Entorno virtual con AR y Senso Glove; (b) Entorno físico y virtual del proceso; (c) Detección de fallas de proceso visualizada en el entorno 3D; (d) Entorno virtual con AR. ....	74
Figura 3.18 Análisis del tiempo de respuesta ante errores provocados por el usuario. ....	76
Figura 3.19 Tiempo de respuesta con AR y Senso Glove. ....	76

Figura 3.20 Análisis de tensión trifásica. ....	77
Figura 3.21 Comparación de valores de armónicos de tensión en los sistemas propuestos. 78	
Figura 3.22 Arquitectura DT inmersiva para MES. ....	95
Figura 3.23 Diagrama de clases de comunicación para la arquitectura propuesta. ....	96
Figura 3.24 Topología del dispositivo y de la red del DT.....	97
Figura 3.25 Secuencia para realizar el diseño digital de las estaciones. ....	98
Figura 3.26 Arquitectura Digital Twin inmersiva para MES. ....	99
Figura 3.27 Comunicación del proceso con OPC UA y Node-RED. ....	100
Figura 3.28 Línea de producción de Digital Twin-MES; (b) Línea de producción MES. ....	102
Figura 3.29 Análisis de respuesta a errores causados por el usuario. ....	102
Figura 3.30 Entorno físico y virtual con AR y VR. ....	103
Figura 3.31 (a) Mapeo digital y (b) Entorno físico para evitar obstáculos. ....	104
Figura 3.32 Histograma del porcentaje de mejora del DT-MES. ....	106

## Lista de Tablas

Tabla 1.1 Impacto de la adopción de la Industria 4.0 [18]. .....	10
Tabla 1.2 Tecnologías y Ventajas que presenta OPC UA .....	13
Tabla 3.1 Publicaciones realizadas .....	37
Tabla 3.2 Parámetros para el diseño de Digital Twin .....	50
Tabla 3.3 Preguntas de funcionamiento y operatividad del Digital Twin.....	50
Tabla 3.4 Características de la computadora .....	72
Tabla 3.5 Lista de los artículos más relevantes con arquitecturas implementadas en la industria.91	
Tabla 3.6 Análisis de tiempos de evitación de obstáculos para el MES vs. el DT-MES.....	105

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

Actualmente la industria manufacturera está experimentando un cambio transformador hacia la digitalización, la automatización y la conectividad, con el objetivo de crear sistemas de producción altamente eficientes y flexibles, calificados para adaptarse a las demandas actuales y dinámicas del mercado. Por lo cual muchas empresas han decidido digitalizar sus procesos para mejorar su flexibilidad, eficiencia y rendimiento en la producción y seguir siendo competitivos en un mundo industrial donde todos buscan aprovechar las nuevas oportunidades. La industria 4.0 se caracteriza por una transformación digital en continua evolución y está orientada a la creación de sistemas y servicios cada vez más flexibles, interoperables e innovadores, que comprenden sistemas y subsistemas industriales que se integran y admiten una alta modularidad y reconfigurabilidad de los componentes [1][2].

Hoy en día, la creciente necesidad de mejorar los niveles de rendimiento y reducir los costos de producción está obligando a la industria manufacturera a implementar diferentes herramientas de monitoreo, control y optimización, experimentando un cambio hacia la fabricación inteligente a través de la digitalización. Esto se ha logrado por el rápido desarrollo tecnológico de la Inteligencia Artificial (AI), Realidad Inmersiva, Big Data, Digital Twin, Computación en la Nube, Internet de las cosas (IoT), Sistemas Ciberfísicos entre otros [3][4]. La inclusión e integración de estos componentes tanto en hardware como en software deben interactuar sin problemas y de manera segura, por lo que la selección de los protocolos de comunicación es muy importante para garantizar los resultados.

Al hablar de I4.0 y digitalización, uno de los conceptos que ha adquirido gran relevancia por la industria y la academia son los sistemas ciberfísicos. Éstos son sistemas multidimensionales y complejos que integran el mundo cibernético y el mundo físico agregando nuevas capacidades mediante la integración de tecnologías, máquinas, procesos de fabricación, computación y comunicación. Se

caracterizan por la capacidad para detectar cualquier cambio en el proceso físico y reaccionar ante ellos debido a que los procesos y operaciones pueden monitorearse y controlarse desde estos espacios computacionales. Se considera que entre las tecnologías habilitadoras que están presentes en el desarrollo de la I4.0, el DT marca el camino para la integración ciberfísica completa [5], porque el lado “cibernético” de los CPS suele ser el entorno de alojamiento del DT, que se define como una copia digital de un activo físico que tiene la capacidad de usar modelos virtuales digitalizados que pueden reflejar los estados, planificar, controlar, analizar, predecir cambios dinámicos y transferir valores optimizados para interactuar con el objeto físico [6]. También se tiene que los CPS han permitido el desarrollo de diferentes conceptos de fábricas inteligentes, autoorganización, individualización del diseño, adquisición, distribución inteligentes y eficiencia de recursos [7]. Si bien los CPS no son tecnología nueva, están teniendo cada día mayor relevancia en la industria por los beneficios y las capacidades que presentan para interconectar e integrar el mundo físico y virtual dentro de los entornos industriales. Además, con la aparición y desarrollo de las tecnologías inmersivas como la realidad aumentada, realidad virtual y metaverso, permiten aumentar las características y brindar mayores prestaciones en los diferentes ciclos de producción.

El DT emerge como un facilitador fundamental y un puente tangible para revolucionar la industria al permitir simulaciones virtuales de sistemas físicos en tiempo real por lo cual ha atraído una gran atención de la industria y academia en los últimos años. Sin embargo, no existe un concepto claro ni tampoco una metodología establecida para el desarrollo de arquitecturas basadas en DT. Diferentes organizaciones alrededor del mundo están trabajando con el objetivo de estandarizar la definición, los límites, la interoperabilidad y la interacción que deben tener estos sistemas [1][8].

El DT no sólo se vincula al objeto físico en el mundo digital y lo emulan, sino que también incluyen algoritmos y recolección de datos basados en sensores para proporcionar herramientas que permitan la experimentación en función de los cambios que va sufriendo el proceso y pueden aplicarse para la predicción, apoyo en la toma de decisiones, desarrollo y mejora anticipada de nuevos productos, etc. Hoy en día, el DT ha recibido una atención importante por sus amplias capacidades de percepción, optimización y control, mostrando así un gran potencial para solventar los problemas anteriores que se presentaban en la I4.0 [9].

En la investigación realizada se observa que la mayoría de las definiciones encontradas coinciden en que los DT deben poseer las siguientes características:

- (1) reflejar fielmente la estructura, dinámica y el estado del sistema físico.
- (2) optimizar y actualizar los diseños y procesos del sistema físico en tiempo real.
- (3) comunicación bidireccional entre las entidades físicas y virtuales.
- (4) tener capacidad de simulación anticipada en función de los datos obtenidos del proceso.

En 2021 la Organización Internacional de Normalización (ISO) estableció bajo la norma ISO 23247 una definición general para DT y su arquitectura para la industria, donde sus métodos de implementación y aplicaciones se encuentran en un marco abierto [10]. Es decir, proporciona una arquitectura global que contiene las siguientes entidades:

- (1) entidad de usuario que incluye la interacción hombre-máquina, sistemas de ejecución de fabricación, planificación de recursos empresariales y otros DT.
- (2) entidad principal que consta de servicios de gestión y representación digital de elementos de fabricación observables.
- (3) entidades de recolección de datos y control de dispositivos.
- (4) entidad multisistema que incluye todos los servicios de comunicación [11].

Al promover un marco abierto no se restringen el uso o integración de nuevas tecnologías, así como del uso de protocolos y plataformas para el desarrollo de arquitecturas. Esto representa ventajas donde se puede integrar hardware y software en función de las necesidades de cada proceso, consiguiendo una mayor acogida para el diseño e implementación. Todo ello acelera el desarrollo de dicha tecnología, sin embargo, también se generan desafíos principalmente por la falta de comprensión o unificación de la definición del DT, hace que las metodologías propuestas varíen considerablemente y dependan del contexto de aplicación y necesidades propias de cada industria donde el enfoque más apropiado en términos de implementación del DT busca principalmente aumentar la producción mediante la mejora y toma de decisiones en los procesos.

Además, se pueden ampliar las ventajas que tiene el DT al integrarlo con nuevas tecnologías con el objetivo de fortalecer las prestaciones desde los niveles corporativos hasta el nivel de campo. La integración del DT con tecnologías inmersivas como AR y VR, puede aumentar los beneficios y crear entornos flexibles e interactivos para el monitoreo y control de los procesos en diferentes etapas y además tenga la posibilidad de crear entornos colaborativos y de simulación anticipada para apoyar a la toma de decisiones. Al tener un rápido desarrollo de estas tecnologías inmersivas junto con la disponibilidad comercial, reducción de costos y robustez en los equipos favorece el uso en diferentes escenarios.

AR y VR actualmente tienen una gran atención para su adopción dentro de los espacios y procesos industriales gracias a las características que presentan y beneficios que pueden aportar. AR es una tecnología disruptiva que brinda una experiencia realista a los usuarios agregando información virtual al entorno real con un potencial para revolucionar diversos aspectos de la fabricación, incluidas las operaciones de línea y optimización de la interfaz de usuario para crear una experiencia interactiva y fácil de usar [12], además, ayuda a comprender procesos complejos, detectar errores y tiene la capacidad de simular virtualmente el uso de equipos o procesos antes de la instalación y evitar errores [13].

Dentro de la I4.0 es importante el uso de estándares consolidados y robustos para garantizar la seguridad y transmisión de la información, por estas razones la Arquitectura Unificada de Comunicaciones de Plataforma Abierta (OPC UA) es una alternativa viable para la implementación de una comunicación bidireccional entre sistemas. Es un protocolo que se basa en dos modelos de comunicación: cliente/servidor y publicación/suscripción, además, es uno de los protocolos más utilizados dentro de la I4.0 y se considera uno de los principales candidatos para liderar la estandarización y la integración de sistemas para marcos de aplicaciones presentes y futuras, porque ofrece una comunicación independiente de la plataforma y permite conectar sistemas de comunicación en toda la pirámide de automatización [14].

A continuación, se detallan los artículos más relevantes que fueron implementados o propuestos a nivel de simulación en entornos industriales y nos sirven de base para el desarrollo de la presente investigación. Dichos artículos fueron seleccionados de bases de datos relevantes e indexados para garantizar que la información obtenida sea relevante.

En [15] proponen un DT centrado en el autodesarrollo para la creación de datos digitales a partir de formas físicas para posteriormente inspeccionar, registrar los datos de producción y establecer una comunicación digital. Se utilizó VR donde se crearon ambientes con Unity y para la comunicación el protocolo Modbus TCP / IP en conjunto con OPC. Los resultados mostraron que el DT propuesto puede comunicarse con diferentes capas de la pirámide de automatización. De la presente investigación se puede resaltar que utilizan protocolos industriales y esto permite la comunicación entre capas que es un punto importante para el DT en la I4.0.

En [16] presentan el desarrollo de una arquitectura modular para la implementación del DT. La propuesta se basa en herramientas de código abierto, protocolos livianos de comunicación y software flexible para el modelado y la visualización 3D. Se puede destacar el uso de hardware industrial como PLCs, red Ethernet / Wifi en conjunto con herramientas como Simulink, además muestra de manera detallada los pasos para la arquitectura propuesta.

En [17] proponen una arquitectura para construir un DT basado en IIoT, IA y Big data aplicado a un entorno real de producción. Se puede destacar que en la arquitectura utilizada cuenta con sistemas MES, DCS, Database que son comunicados mediante IoT, a diferencia de los enfoques tradicionales integra IA y el big data industrial para entrenar y optimizar los modelos del DT, de esta manera puede adaptarse a la dinámica cambiante que se tiene en las industrias y responder de manera oportuna. Si bien la arquitectura es interesante y completa no muestra el hardware, software o protocolos de comunicación utilizados sin embargo los resultados muestran un caso de estudio satisfactorio.

En [18] proponen un marco para el DT habilitado por el aprendizaje profundo para la toma de decisiones en la planificación de procesos inteligentes. Se realiza la integración de redes residuales profundas, que comprendan las intenciones de diseño expresadas en un diseño CAD 3D. Los resultados experimentales mostraron la eficacia donde el DT puede transformar los procesos teóricos en operaciones prácticas y producir un plan de proceso óptimo. Si bien el artículo se centra y detalla el entrenamiento y aprendizaje se puede destacar el marco propuesto por la versatilidad de integrar nuevas funciones.

En [19] presentan una metodología novedosa para el diseño de la automatización de procesos, mediante un DT del proceso en conjunto con VR inmersiva, con el objetivo de crear un banco de pruebas virtual y también puede ser utilizado para la capacitación de operadores. En la propuesta se detalla los pasos para el diseño,

requerimientos, viabilidad, modelado, simulación, implementación, comunicación, visualización y puesta en marcha real del proceso de fabricación reflejado en su DT. Estos pasos son importantes ya que utiliza tecnología inmersiva en conjunto con el DT que es uno de los objetivos del presente trabajo.

En [6] proponen una forma de integrar un Digital Shadow con un sistema MES para mediante la integración de estas tecnologías crear un DT. El sistema propuesto es utilizado para la toma de decisiones en el proceso gracias a que cuenta con una capa de inteligencia en la que se albergan las reglas y el conocimiento. El sistema propuesto es interesante debido a que utiliza estándares ISO e IEC para la comunicación de la pirámide de automatización, CPS y MES, además detalla como establecer una comunicación bidireccional y simulación de modelos en tiempo real para el DT mediante la integración del mundo físico y virtual. Dentro de los protocolos utilizados para la comunicación se destaca OPC UA, M2M, TCP y MQTT y además el uso de Matlab Simulink para la creación de bloques modulares personalizados para leer los datos de los sensores y mediante la conexión cliente servidor que brinda OPC UA. El resultado muestra que se ha alcanzado una simulación sincronizada con el CPS al MES, cerrando de esta manera el bucle de control y logrando un DT que permite una comunicación bidireccional autónoma y en tiempo real entre los entornos físicos y virtuales.

En [20] se enfocan en la solución del DT para la optimización de las líneas de producción. Mediante tres pasos que son: la creación de un modelo de simulación del mundo real mediante el software Siemens Tecnomatix Plant Simulation, comunicación entre el entorno real y virtual mediante SIMATIC TIA Portal y finalmente la integración de DT mediante la simulación y automatización. Dentro de las características que se configuran en programan en el DT se deben considerar las siguientes: (1) planificación de la producción para evitar tiempos de inactividad no planificados, (2) apoyo en la toma de decisiones continua para la optimización de la producción, (3) prevención del error humano en la producción real mediante simulación y pruebas virtuales, y (4) detección y eliminación de problemas dentro del sistema de producción. Estas características y el uso de protocolos industriales para la comunicación son relevantes para marcar un camino en el desarrollo de los DT.

En [21] presenta la implementación de un DT apoyado en AR, donde la metodología propuesta se divide en tres niveles: dispositivo físico, servidor de datos e interfaz gráfica de monitoreo, con el objetivo de desarrollar un HMI para el monitoreo remoto e interactivo de sistemas ciberfísicos industriales. Para el diseño

del entorno virtual se utilizó el motor de desarrollo de juegos Unity 3D, y el software Blender para realizar el modelado y animación de los entornos virtuales del proceso industrial donde se utilizó la herramienta “Animator” y algoritmos en lenguaje C# para controlar las animaciones del DT en función de la base de datos. Para el proceso se utilizó el software 3D Factory I/O y la programación se realizó en la plataforma TIA Portal. La comunicación del proceso industrial con el DT se realizó con la herramienta NetToPLCsim, donde se generó un servidor de red y posterior comunicación TCP/IP con la herramienta NodeRed, donde los datos son direccionados y almacenados a la base de datos Firebase. El trabajo es muy interesante y a pesar de que fue realizado a nivel de simulación, la arquitectura muestra el uso de diferentes herramientas que pueden ser utilizadas en un caso práctico real.

En [22] proponen una arquitectura basada en cliente OPC UA, para crear un DT de un proceso de manufactura. Para el monitoreo y control del sistema utilizaron dispositivos móviles con conexión a la red mediante una tarjeta Raspberry Pi en conjunto con microcontroladores típicos. La arquitectura que proponen los autores es bastante interesante debido a la distribución que realizan, la cual consta de diferentes nodos que se describen a continuación: (1) nodo cliente/puerta de enlace, que actúa como punto de intersección entre controladores industriales, sistemas integrados y servicios en la nube. Además, tiene capacidades para realizar tareas y cálculos complejos de manera local y permite el intercambio de datos con plataformas de nube comunes, (2) nodos de servidor que son los controladores industriales, como los PLC, o sistemas embebidos. Se debe resaltar que al ejecutar un servidor OPC UA en cada controlador dentro de la arquitectura permite establecer restricciones para publicar datos específicos de acuerdo a los requerimientos propios de cada línea de producción, dar prioridad a los servidores que recopilan datos críticos y además tener una redundancia en el sistema, ya que la falla de un servidor no provocará una falla total del sistema, (3) servicios en la nube como Microsoft Azure y Amazon Web Services, donde se puede utilizar las herramientas disponibles en la nube y una gama completa de funcionalidades, incluidos algoritmos de IA, almacenamiento, monitoreo y visualización, y (4) nodos de usuario final que pueden incluir dispositivos específicos del usuario como teléfonos móviles con acceso a la nube y además permite el intercambio de información entre aplicaciones específicas de manera segura.

En [23] propone un enfoque para el desarrollo de DT en sistemas industriales con integración de AR y VR, con incorporación de tecnologías habilitantes, integración

de sistemas, protocolos industriales, servicios en la nube para potenciar las capacidades del DT. Se utiliza Unity por su capacidad multiplataforma y debido al modelado agilizado de sistemas industriales, para la integración de AR se facilita mediante el SDK Vuforia, para la comunicación utilizaron el protocolo MQTT en conjunto con Node-RED para tener una integración total del sistema y finalmente se recomiendan los servicios basados en la nube para el almacenamiento y procesamiento de datos efectivos. La metodología propuesta proporciona una comprensión completa del proceso modelado además de la interacción y visualización dinámica de sistemas físicos en la entidad virtual. El método también sirve como referencia para procesos similares debido al uso de un marco estandarizado, se convierte en un recurso útil para que pueda ser replicado en una variedad de situaciones.

Como se observa las arquitecturas propuestas no están diseñadas bajo ningún estándar, sin embargo, sus implementaciones muestran resultados prometedores y beneficios en los procesos implementados, lo cual es una muestra que la tecnología DT esta aun en desarrollo y deja las puertas abiertas para que tanto la industria y la academia pueda seguir investigando nuevas arquitecturas con la unión de nuevas tecnologías. Los trabajos mencionados son una base para el desarrollo de la investigación debido a que utilizan propuestas innovadoras que pueden ser llevadas a un marco estandarizado y así potenciar el desarrollo y capacidades.

En la presente investigación se utiliza el término en inglés “Digital Twin” por qué es un término reconocido a nivel internacional en la literatura técnica y científica, permitiendo una adaptación al contexto tecnológico y tiene un posicionamiento de marca debido a que el término ya tiene un reconocimiento establecido en la industria y academia.

## **1.2. Industria 4.0**

La Industria 4.0 o también conocida como fabricación inteligente representa la transformación integral de toda la línea de producción industrial mediante la fusión del internet y las tecnologías de la información y la comunicación (ICT) con los procesos de fabricación tradicionales [24]. Gracias a la creciente disponibilidad de conectividad que permite optimizar los procesos de fabricación a través de la automatización inteligente, mediante el uso de tecnologías emergentes - inteligencia artificial, robótica, internet de las cosas, análisis de datos,

arquitecturas orientadas a servicios (SOA), fabricación aditiva, DT, big data, computación en la nube y CPS que permiten la operación de industrias de una manera flexible, eficiente y ecológica [25]. De manera genérica, se puede afirmar que el paradigma de la I4.0 se fundamenta en cuatro principios que son la interconectividad, transparencia de la información, asistencia tecnológica y toma de decisiones descentralizada. Sin embargo, con el desarrollo de nuevas tecnologías han surgido nuevas perspectivas alternativas que implican la adición de nuevas dimensiones a los pilares centrales antes mencionados que son: virtualización, capacidad en tiempo real, orientación al servicio y modularidad [26].

Los sistemas de fabricación tradicionales utilizan protocolos de comunicación dependiendo de los niveles de la pirámide de automatización y dependientes del proveedor, limitando la escalabilidad, flexibilidad y adaptabilidad de los sistemas integrados, eso genera paradigmas y limitantes para estar preparados ante una demanda creciente en la industria de aplicaciones distribuidas, donde los componentes de diferentes fabricantes deben comunicarse en un lenguaje común mediante protocolos de comunicación estandarizados.

El objetivo de I4.0 es desarrollar una nueva generación de fábricas inteligentes que ofrezcan la capacidad de tener una producción personalizada y rentable mediante el uso de estándares de alta calidad en los procesos de ingeniería, fabricación y planificación. En la figura 1.1 se muestran las principales tecnologías habilitadoras de la I4.0.

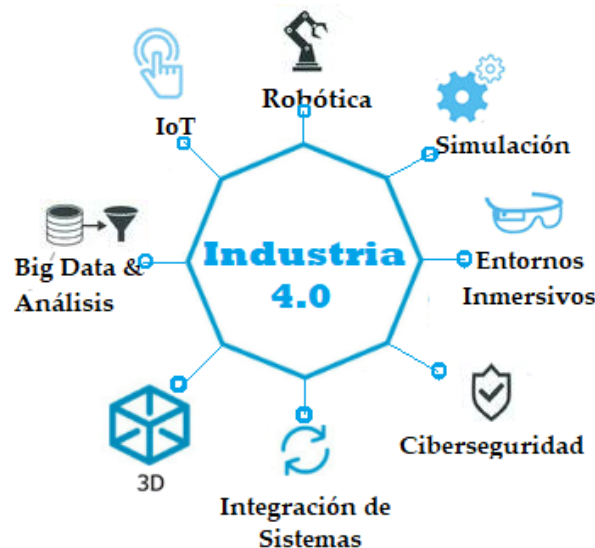


Figura 1.1 Principales tecnologías habilitadoras de la industria 4.0.

Este tipo de automatización se caracteriza por un elevado nivel de digitalización, organización y control a lo largo de todo el proceso. Esto incluye aspectos como la trazabilidad, la conectividad de máquina a humano, la monitorización de entidades físicas en un entorno digital o ciberespacio y experiencias personalizadas para el cliente. Además, se están produciendo grandes avances en ciberseguridad que es uno de los factores importantes en la industria, donde los datos usualmente residen en el CPS y en la nube por lo que la seguridad es un factor en el que se debe trabajar ya que un cambio o pérdida de información puede causar daños o pérdidas significativas. También se tienen avances en la descentralización de procesos lo cual beneficia directamente en los tiempos de respuesta, toma de decisiones, seguridad y manejo de la información.

Además, se debe considerar que uno de los puntos clave para la I4.0 es el intercambio de datos y la comunicación de red entre dispositivos industriales en diferentes entornos de fabricación, debido a que existe la falta de estándares interoperables para las comunicaciones industriales. Una de las tecnologías más utilizadas en la industria es IIoT, por la interconexión que brinda a las máquinas, incorporación de sensores inteligentes y cantidad de datos que tienen que ser procesados, por lo cual, se debe asegurar una comunicación que ofrezca: confiabilidad, escalabilidad, latencia, y seguridad, para garantizar operaciones fluidas.

Con el desarrollo de la I4.0 se ha evidenciado que las empresas muestran ventajas competitivas mediante la innovación y adopción de nuevas tecnologías para el mejoramiento continuo de procesos, productos y servicios de manera efectiva, a su vez estos cambios se reflejan un impacto directo en las áreas social, económico y ambiental. En la tabla 1.1 se muestra los impactos que ha generado la adopción de la I4.0.

Tabla 1.1 Impacto de la adopción de la Industria 4.0 [27].

Dimensión		ICTs	IA	IoT	RFID	Robótica	Fabricación aditiva	AR & VR	CPS	DTs
Eficiencia	Incremento de la producción	X	X	X	X	X		X	X	X
	Mejora de la gestión	X	X	X	X	X			X	X
	Aumento del valor agregado	X	X	X	X			X	X	X

	Reducción energética	X	X	X		X	X				
	Disponibilidad tecnológica	X	X	X	X	X		X	X		
Calidad	Mejora de la calidad del proceso	X	X	X	X	X		X	X	X	
	Mejora de la calidad del producto	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Agilidad, flexibilidad y rendimiento del mercado	Adaptación al mercado	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Disminución de tiempo del pedido	X	X	X	X	X	X	X	X		
	Personalización de productos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Simulación	X	X	X	X		X	X		X	
	Facilita la introducción en el mercado	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Integración vertical de sistemas	X	X	X						X	X
	Satisfacción del cliente	X	X	X					X		X
Organización interna	Estandarización y escalamiento	X	X	X	X	X					
	Operabilidad entre departamentos	X	X	X					X	X	
	Facilitación de fusiones y adquisiciones	X	X	X					X	X	
Mercado Laboral	Inversión y Empleo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Enriquecimiento laboral	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Condiciones laborales	Reducción de la carga de trabajo	X	X	X	X	X			X	X	
	Mejora de las condiciones ergonómicas	X	X	X	X	X		X	X	X	
	Motivación del empleador	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Seguridad de los empleados	X	X	X	X	X		X	X	X	
Emisiones y energía	Reducción de emisiones	X	X	X		X		X	X	X	
	Reducción del consumo de recursos naturales	X	X	X		X	X		X		
Circularidad	Facilitación de la industria circular	X	X	X	X	X	X	X		X	

Los beneficios de la I4.0 son evidentes para las grandes empresas que presentan una innovación tecnológica constante, sin embargo, las pequeñas y medianas empresas manufactureras a menudo no cuentan con recursos suficientes, por lo

que les resulta difícil competir con las grandes empresas y podría tener consecuencias negativas.

A gran escala, el entorno de la I4.0 genera impulsos para profundizar cambios en el desarrollo de la economía mundial, que se caracteriza por cambios cualitativos y cuantitativos en la estructura de producción en masa, sin embargo, el consumidor sigue dando preferencia a los productos de alta calidad, pero buscan que los productos sean más asequibles y económicos. Al mismo tiempo, la competencia global se está incrementando por el uso de herramientas de gestión innovadoras, sin embargo, las condiciones para las actividades industriales y comerciales, así como la formación de ventajas competitivas, son hoy las condiciones de la Industria 4.0 [28].

No obstante, las pequeñas y medianas empresas, especialmente aquellas que operan dentro del sector manufacturero, continúan sufriendo inconvenientes con la integración, a pesar de que se tiene una transición clara hacia los sistemas de fabricación digitalizados e interconectados, una gran parte de estas empresas muestran una digitalización inadecuada y enfrentan importantes obstáculos para adoptar estas tecnologías. La cuarta revolución industrial genera factores y componentes de competitividad fundamentalmente nuevos, por lo que es importante desde la academia generar propuestas e investigaciones para el diseño de metodologías y arquitecturas para la I4.0 de bajo costo y con el uso de tecnologías, plataformas y protocolos flexibles y adaptables a cualquier entorno industrial.

A pesar de que la I4.0 y sus tecnologías habilitadoras continúan aun en desarrollo, varios investigadores han empezado a hablar de un nuevo enfoque, donde se menciona que cuando el sistema involucra a un ser humano, es necesario considerar varios aspectos técnicos y no técnicos que actualmente se están definiendo en la llamada industria 5.0, la cual se refiere a un nuevo modelo que se centra en la interacción que tienen los humanos y las máquinas, es decir coloca los intereses humanos en el centro del proceso de producción. Sin embargo, en la Industria 4.0 no excluye a los seres humanos, pero busca integrarlo a través de entornos de realidad inmersiva, robots colaborativos y el uso de diversas interfaces hombre-máquina (HMI), es decir los seres humanos desempeñan un papel particularmente crucial en el mundo físico.

El enfoque humano es un pilar fundamental de la Industria 5.0 sin embargo, aún no existe una definición clara de las tecnologías industriales emergentes y los

métodos establecidos para ayudar a los trabajadores y su integración en los sistemas de las fábricas [7]. Uno de los objetivos es combinar la experiencia que tienen los operadores con la eficiencia de los robots autónomos y los sistemas automatizados, con el objetivo de tener procesos con una mejor productividad, mayor confiabilidad y la entrega de productos personalizados. Por otro lado, las Colaboraciones Humano-Robot (HRC) permitirán la implementación conjunta de diferentes actividades entre operarios y robots industriales, repercutiendo así en mejores procesos de fabricación. Sin embargo, el HRC todavía se encuentran en desarrollo porque requiere mecanismos de seguridad avanzados, que deben evitar daños involuntarios a los empleados humanos por parte de sus compañeros robots [29].

### 1.3. OPC UA

OPC UA es un protocolo de comunicación máquina a máquina orientado a servicios que se utiliza principalmente en la automatización industrial y se define en la especificación IEC 62541 [30]. Entre sus principales objetivos están proporcionar un protocolo de comunicación multiplataforma y su arquitectura está basada en modelos de información y funcionalidades de seguridad integradas. Fue diseñado para aprovechar el potencial de las tecnologías modernas en la creación de fábricas inteligentes abarcando: dispositivos móviles, bases de datos, inteligencia artificial, visión artificial, mantenimiento predictivo, entre otros [31].

A partir de la aparición del protocolo OPC UA, los investigadores centraron su atención porque cubre la mayoría de los requisitos para un estándar de interoperabilidad independiente de la plataforma, por lo que se considera uno de los principales estándares de referencia para un intercambio interoperable de información e integración de sistemas para aplicaciones dentro de la I4.0. Las principales ventajas y tecnologías que tiene OPC UA se muestran en la Tabla 1.2 [32].

Tabla 1.2 Tecnologías y Ventajas que presenta OPC UA

<b>Tecnologías</b>	<b>Ventajas</b>
Un metamodelo para definir modelos de información específicos.	Independencia de plataforma, comunicación segura.
Especificaciones del protocolo de transporte para el intercambio de datos entre dispositivos.	Buena extensibilidad, está impulsado principalmente por la industria manufacturera Europea.

Tiene modelos de comunicación basados en cliente / servidor y publicador / suscriptor.	Comunicación con dispositivos de otras marcas y sistemas embebidos de bajo costo.
Servidores OPC UA, que contienen el modelo de información. Es una estructura jerárquica compuesta por conjuntos de nodos e información de proceso	Soporte de modelado de información integral.
Cientes OPC UA, que envían/reciben mensajes para acceder a datos de los nodos en el modelo de información del servidor OPC UA.	Descripción semántica del modelo de espacio de direcciones junto con especificaciones que amplían las descripciones para varios dominios.

El estándar se basa en modelos de comunicación cliente / servidor y publicador / suscriptor, que proporciona un modelo de información integral enriquecido para representar datos y la semántica relevante. Es un protocolo que está listo para comunicarse con el internet gracias a que cuenta con protocolos HTTP y multiplataformas que no depende de los componentes COM y DCOM, lo que implica que cualquier aplicación OPC UA se pueda implementar fácilmente en múltiples plataformas informáticas como sensores inteligentes, PLC, sistemas embebidos, puertas de enlace, etc. Por lo tanto, es posible adoptar un enfoque diferente para la transformación digital, como se muestra en la Figura 1.2.

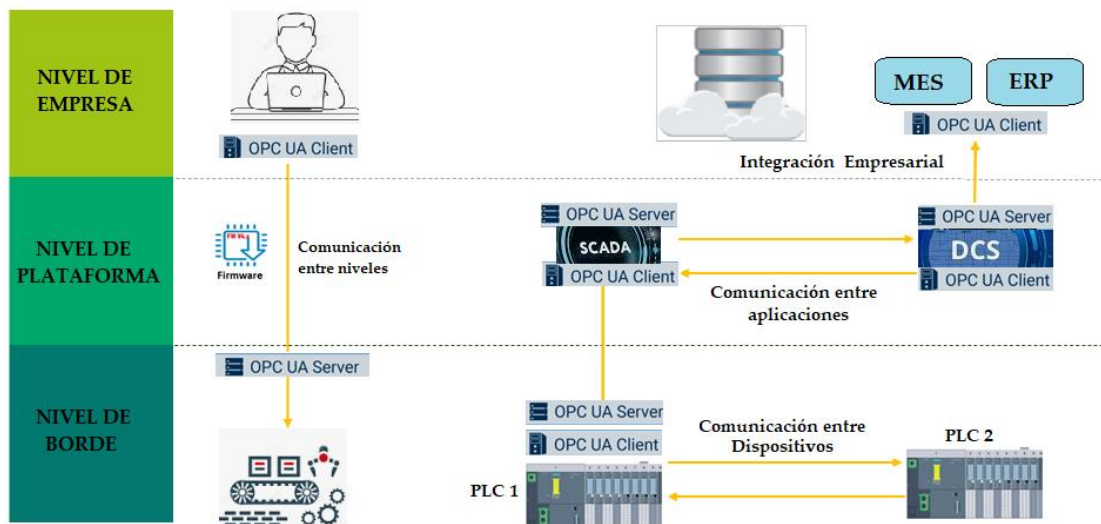


Figura 1.2 Transformación digital con OPC UA [33].

OPC UA tiene el potencial de ser uno de los estándares clave en el desarrollo de la I4.0. Una de las características clave y más destacadas es que permite la interoperabilidad independiente de la plataforma que se esté utilizando y también

puede realizar la integración de tecnología nueva con dispositivos heredados, esto abre las puertas a que las pequeñas empresas puedan hacer un cambio paulatino de tecnología de acuerdo con las necesidades para disminuir los costos de migrar a una fabricación inteligente.

## 1.4. Sistemas Ciberfísicos

Los CPS pueden definirse como sistemas inteligentes interactivos multidimensionales que contienen un conjunto de dispositivos, redes de comunicación y equipos o dispositivos que interactúan con el ciberespacio [34]. Se los conoce como la columna vertebral de los sistemas digitales y permiten el intercambio de información en tiempo real para monitorear, analizar y controlar el mundo físico. Los entornos CPS pueden verse como la fusión de entornos de tecnología de la información (IT) y tecnología operativa (OT), cada uno con distintas prioridades con respecto a la seguridad del sistema [35]. Desempeñan un papel importante para mejorar la eficiencia, la seguridad y la confiabilidad del sistema y se aplican ampliamente en industrias, transporte, medicina, aeroespacial, vehículos, hogares inteligentes y otros campos [36].

En la figura 1.3 se muestra los componentes principales de los sistemas ciberfísicos.



Figura 1.3 Componentes principales de un sistema ciberfísico.

Los CPS comprenden una red de dispositivos que a menudo presenta limitaciones de almacenamiento o de ancho de banda. Para solventar esta limitación se propone la incorporación de nodos de ejecución en una red de borde, utilizando recursos informáticos en estos nodos como sustitutos de la ejecución de cargas de trabajo

desde dispositivos con recursos limitados [37]. Estos parámetros deben ser considerados y analizados en la implementación debido a que dentro de un CPS se tiene:

- 1) Gran cantidad de sensores que recopilan datos de toda la línea de producción y mantiene una comunicación frecuente para transferir información del mundo físico al mundo virtual (cibernético).
- 2) Procesamiento de datos mediante un análisis computacional.
- 3) Resultados del análisis, donde los datos son enviados de regreso al mundo real, logrando la optimización de las operaciones.

Se caracterizan por tener una conectividad avanzada que garantiza la adquisición de datos y una retroalimentación del mundo virtual, de esta manera proporciona un elemento esencial para diseñar sistemas integrados e interactivos con conectividad y sincronización en la I4.0, de esta manera aumenta las perspectivas de las empresas hacia un entorno más adaptable y flexible en función de las necesidades actuales. Los CPS cierran la brecha que existía entre los entornos físicos y digitales, lo cual es esencial para el desarrollo de la I4.0.

La introducción de los CPS ha provocado una alteración en la pirámide de automatización convencional con tareas bien definidas y separadas, hacia una propuesta basada en sistemas embebidos y distribuidos donde los CPS exhiben diversos grados de inteligencia y autonomía para ejecutar tareas específicas y comunicarse con el entorno externo para el cumplimiento de diversas funciones participando activamente en el flujo del proceso de producción mediante los sistemas de Planificación de Recursos Empresariales (ERP) y Sistema de Ejecución de Manufactura (MES) [26].

La creciente incorporación de CPS en diferentes áreas ha provocado un aumento notable de ataques maliciosos por parte de adversarios, lo cual ha provocado incidentes en industrias manufactureras, infraestructura civil, redes eléctricas y oleoductos. Este aumento de los ataques puede atribuirse al incremento de la conectividad de la industria con la red de internet pública, lo que amplifica sustancialmente la vulnerabilidad [35]. Dentro de los métodos para detección de estos ataques se tiene el uso de algoritmos de inteligencia artificial, sin embargo, hay que considerar que en los ataques se tienen variaciones constantes en las características y datos, por lo que los resultados tienen limitaciones para cada entorno y es difícil alcanzar una detección completa de anomalías en los CPS. Una estrategia prometedora para la detección de anomalías es implementar algoritmos

de Aprendizaje Conjunto EL (siglas del inglés Ensemble Learning) que utiliza múltiples algoritmos de ML con lo que se puede proporcionar diferentes pesos a cada algoritmo con el mismo conjunto de datos, lo que conduce a un mejor rendimiento predictivo ya que los conjuntos de datos altamente desequilibrados se pueden minimizar combinando múltiples modelos de clasificadores débiles para obtener un modelo sólido [38].

La integración de DT en los CPS trae claras ventajas, sin embargo, se debe trabajar con presión en el modelado de sistemas, la red existente, la computación, y el análisis preciso de datos en tiempo real, además que debe cumplir y garantizar requisitos como: la latencia, seguridad, escalabilidad, confiabilidad, protección y privacidad del CPS [39]. Con la evolución constante de la tecnología DT, se muestra que tiene un rol muy importante en el campo de los sistemas ciberfísicos industriales (ICPS), debido a que reduce la brecha entre las entidades físicas y virtuales, gracias a la representación dinámica y rica en datos de los procesos físicos, lo que proporciona información constante y ayuda en la toma de decisiones en diversas áreas. Además, con la llegada de los sistemas ciberfísicos basados en la nube (C2PS) se ha llevado el desarrollo del modelo de referencia para DT, donde se muestra su versatilidad a través de la generación de sistemas complejos y aplicaciones prácticas [40].

El concepto de gemelo digital como proxy (DTaaP) se ha propuesto para abordar los desafíos de los sistemas ciberfísicos industriales (ICPS). Al implementar un modelo arquitectónico de cuatro capas, DTaaP tiene como objetivo mejorar la eficiencia energética, las capacidades de seguridad y la disponibilidad de los dispositivos. La integración de Eclipse Ditto como un marco de gemelo digital de código abierto muestra el potencial de DTaaP para mejorar los ICPS.

Por estos motivos se deben considerar que aún existen varios desafíos que se deben superar antes de que los DT puedan implementarse por completo, a pesar de que se tiene un rápido desarrollo en las tecnologías de computación, análisis de datos, seguridad y red. Una de las formas que se está proponiendo para la protección y privacidad de datos, es mediante la utilización de técnicas de IA para diseñar modelos de aprendizaje automático y de esta manera tener al alto y rápido procesamiento de información para posteriormente lograr que estos datos se reflejen en cada evento físico o digital de manera precisa y confiable.

## 1.5. Internet de las Cosas

La aparición de la Internet de las cosas (IoT) ha mostrado una nueva era en la conectividad y toma de decisiones basada en datos y ofrece una oportunidad increíble para la industria manufacturera. En este contexto, la IoT industrial (IIoT) ha surgido como una fuerza transformadora que ha remodelado el panorama de los procesos y sistemas industriales. IIoT es un área de investigación importante dentro del IoT, debido a que se basa en un ecosistema industrial orientado a servicios, y utiliza la interconexión de recursos industriales mediante la red y posteriormente utiliza estos datos y sistemas para lograr una asignación flexible de recursos y una rápida adaptación al entorno [41].

Gracias a la computación basado en la nube se tiene un gran potencial informático, confiabilidad y escalabilidad, sin embargo, se debe considerar que también se tiene un aumento del tráfico y dispositivos conectados que generan gran cantidad de datos intercambiados entre servidores y dispositivos, lo cual ocasiona congestión en la red. Esto afecta directamente el rendimiento de los sistemas de IoT que son sensibles al retraso, por estos motivos y debido a los requisitos actuales de tiempo real que requiere ciertas áreas de las industrias, no es práctico transferir todos los datos a la nube para su procesamiento.

Para abordar los desafíos mencionados anteriormente se tiene la computación distribuida que descarga las tareas informáticas del IoT a servicios informáticos distribuidos a través de pequeños centros de datos cerca del borde de la red, con la finalidad de proporcionar análisis de datos en tiempo real mediante la reducción del tráfico y a su vez aumentando la capacidad de la red. Por estos motivos la computación de borde es adecuada para aplicaciones con requisitos de latencia [42].

En el ámbito del IoT y los CPS, los DT han revolucionado la gestión de entidades físicas. Sin embargo, al momento de realizar la implementación en el sector industrial a menudo tiene limitantes debido a la flexibilidad limitada del hardware. Sin embargo, con el desarrollo y madurez del DT, se están planteando mayores requisitos para la recopilación y transmisión de datos. El sistema IoT existente no es suficiente para garantizar la recopilación de datos y acciones de todos los procesos. Por estos motivos de debe considerar que es necesario construir un nuevo modelo de recopilación de datos para asegurar la recopilación y tratamiento de la información y transformar a información efectiva que se puedan usar en todas las capas del DT. Dentro de los desafíos que se tiene en la implementación de DT con realidad inmersiva, es que posee características

basadas en datos, un alto uso de recursos informáticos y sensibles a la seguridad que son un desafío para la red IIoT actual, por lo tanto, existe una propuesta mediante un esquema de asignación de recursos distribuidos basado en blockchain con el objetivo de mejorar la calidad de servicio con respecto al retraso y el rendimiento de las transacciones [43].

## 1.6. Digital Twin

Es una réplica digital de un sistema físico que tiene comunicación bidireccional e intercambia constantemente información entre las entidades físicas y virtuales. El DT puede reflejar continuamente el estado de la entidad física y modificar el estado del sistema físico en función de la evaluación del estado actual y la predicción de estados futuros de la réplica digital [44][45]. I4.0 utiliza los DT para crear versiones virtuales de procesos y objetos físicos, para posteriormente mediante la recopilación de datos de diversas fuentes, como sensores, dispositivos y máquinas, se obtenga la información para crear una simulación dinámica que es utilizada para la mejora de un proceso o activo. En este sentido refleja el comportamiento del sistema físico y sus relaciones con los operadores, componentes y toma de decisiones. En conjunto con la inteligencia artificial proporciona un medio para simular, predecir y optimizar los sistemas y procesos de fabricación desarrollando productos y servicios innovadores para diversificar la creación y los modelos comerciales.

Los DT en conjunto con otras tecnologías ofrecen una solución a largo plazo para estudiar, rastrear y pronosticar el comportamiento de sistemas, debido a que comparten el comportamiento operativo con los sistemas físicos teniendo así los datos de todo el ciclo de vida de producción [39].

Es importante comprender las oportunidades y desafíos asociados con la tecnología DT en la Industria 4.0 para aprovechar plenamente su potencial mediante la representación virtual de un sistema o activo físico. De manera general en [46] se describen los siguientes pasos que se deben considerar para el diseño de un Digital Twin en la industria como se muestra en la Figura 1.4.

- (1) modelar y visualizar, lo que implica la creación de una representación 3D de los diversos componentes y relaciones del sistema o activo.

- (2) diseñar y analizar, creación de escenarios para mejorar la comprensión del sistema y toma de decisiones informadas.
- (3) monitorear y predecir mediante la utilización de los datos recopilados por sensores para proporcionar retroalimentación inmediata.
- (4) operar y optimizar, donde se realiza el análisis para probar diferentes estrategias y mejorar su eficiencia.
- (5) automatizar y controlar diversos procesos, como la gestión y producción para la mejora de la eficiencia.

Sin embargo, se debe recalcar que es una descripción general del DT que puede ser utilizada como referencia, sin embargo, la descripción no se basa en un estándar para el diseño de la arquitectura, ni tampoco se menciona el uso de tecnologías, plataformas o protocolos de comunicación específicos.

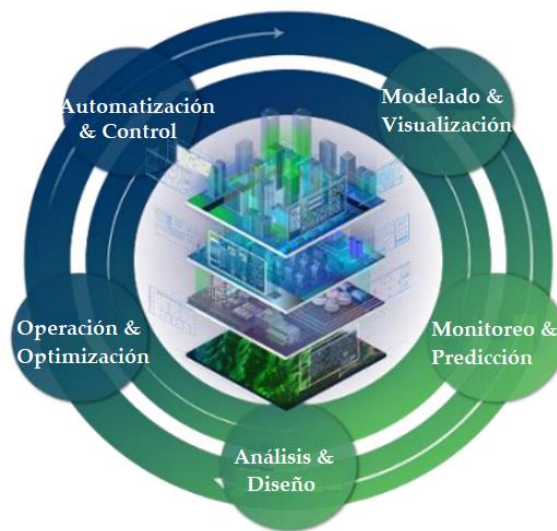


Figura 1.4 Etapas generales de la tecnología Digital Twin [46].

Actualmente el DT está ocupando una posición central en la fabricación inteligente de nueva generación al integrarse con los sistemas ciberfísicos. El objetivo principal es desarrollar una representación virtual de objetos físicos que estén completamente integrados e intercambien información que será procesada por la parte virtual y posteriormente será retroalimentada para el funcionamiento de un sistema físico. Es una tecnología relativamente nueva y los esfuerzos de investigación están orientados a explorar su aplicabilidad, desarrollo y probar medios para su implementación y rápida adopción.

La tecnología DT es ampliamente investigada y utilizada en diferentes áreas como: manufactura, medicina, construcción, petroleras, gas, ciudades inteligentes, etc

[47][48]. Esta gran aceptación en diferentes sectores de la industria y sociedad se debe a sus características para interactuar entre los entornos físicos y virtuales en tiempo real con comunicación bidireccional. En el área de la salud se están aprovechando diferentes tecnologías y sistemas para la atención médica remota, permitiendo al acceso inmediato a los registros médicos y además muestra una reducción en los costos operativos. En la industria manufacturera ha permitido aumentar la interoperabilidad, eficiencia, optimización, reducción de costos, simulación y mejorar la toma de decisiones al proporcionar una amplia e inmediata gama de información. Muestra el potencial de romper la barrera entre el espacio físico y cibernético en la fabricación inteligente, además logra integrar la información del CPS y fusionar datos heterogéneos de múltiples fuentes, apoyando la conexión entre datos virtuales y reales. Según un estudio de Markets, se prevé que el mercado de Digital Twin, valorado en 6.900 millones de dólares en 2022, se disparará hasta la asombrosa cifra de 73.500 millones de dólares en 2027, lo que demuestra una tasa de crecimiento anual compuesto del 60,6% en un lapso de 5 años [47]. También se debe considerar que algunas instituciones internacionales, como la Organización Internacional de Normalización o la Academia Internacional de Ingeniería de Producción, están avanzando en la búsqueda de un marco estándar para la implementación de DTs [4].

### **1.6.1. Clasificación de los DT**

Si bien es cierto que el concepto de DT no está aún bien definido y existe diferentes conceptos de acuerdo con los autores y a las características en la implementación. Varios autores han propuesto una clasificación en función de la tecnología, complejidad, aplicación o integración de tecnologías, sin embargo, a continuación, se detalla la clasificación de los DT según el análisis que realice a los datos y el grado de inteligencia que presente, donde se pueden nombrar los siguientes.

las más utilizadas en el sector industrial debido al impacto que están mostrando.

**DT Prescriptivo:** Son los que utilizan simulación que admite el análisis hipotético para brindar explicaciones y una comprensión profunda de los sistemas, de esta manera puede sugerir la mejor solución ante variedad de opciones optimizando el resultado de eventos futuros que rigen el comportamiento del sistema [49].

**DT predictivo:** Utiliza el análisis de datos como minería de datos, técnicas estadísticas y aprendizaje automático, para alcanzar sus objetivos y extrapolar lo que podría suceder en el futuro. Cuanto más grandes y precisos sean los datos

utilizados, mayores serán los niveles de confianza. Un gemelo de este tipo es una gran colección de datos significativos y bien organizados que permiten una extrapolación fiable a escenarios similares a los que produjeron los datos históricos o de entrenamiento, representando el comportamiento, el estado y el rendimiento futuros de dichos sistemas [49].

**DT Cognitivo:** El DT cognitivo (CDT) está inspirada en los avances de la ciencia cognitiva, aprendizaje automático e inteligencia artificial, por lo cual son considerados los que tienen el nivel más alto de inteligencia que pueden replicar y ejecutar acciones de forma autónoma, con una intervención humana mínima o nula. Esta versión del DT tiene las capacidades de aprender y además está dotado de habilidades cognitivas como la atención, la memoria, la percepción, el razonamiento, etc [50]. Estas características brindan una mejor toma de decisiones basada en la integración de datos mediante una ontología de alto nivel y su uso para proporcionar una visión uniforme y semántica del sistema, de esta manera permite identificar y comprender la dinámica e interacciones actuales entre los modelos virtuales [51].

**Cyber Twin:** Establece una representación digital de los extremos en ciberespacios virtuales en la nube de borde. Es una tecnología que representa un salto transformador en el ámbito de las telecomunicaciones, debido a la integración de tecnologías como: IA, DT y 6G con el objetivo de mejorar el rendimiento de la red y además, puede ofrecer funciones de asistencia de comunicación, registro de comportamiento, proporcionando así servicios complementarios al cliente. Este concepto nuevo promete avances significativos en servicios personalizados, mantenimiento predictivo y conectividad inteligente, impulsando el futuro de la comunicación inalámbrica fluida e inteligente [52].

### **1.6.2. Investigaciones del Digital Twin en el sector industrial**

Para conocer las tendencias y desafíos actuales que tiene la implementación del DT se realiza una revisión general donde se identifican las tecnologías, plataformas, protocolos, fortalezas y limitaciones que tienen las propuestas realizadas por otros autores en función de las arquitecturas y de los resultados obtenidos al aplicarlos en los procesos industriales.

El DT se ha convertido en una tecnología clave en la fabricación inteligente donde las máquinas son la clave para el rápido desarrollo en la industria manufacturera y además, su inteligencia está relacionada con los DT. Se tiene que los métodos de

modelado están principalmente basados en mecanismos impulsados por datos que forman la base del autoaprendizaje y toma de decisiones para las máquinas inteligentes. El mapeo bidireccional incluye mapeos de lo real a lo virtual y de lo virtual a lo real. El mapeo del entorno virtual al entorno real implica instrucciones, toma de decisiones y optimización [53].

Se tienen aplicaciones en el área del mantenimiento como en [54][55] que proponen una metodología para el diagnóstico y predicción de fallas, con el objetivo de compensar las deficiencias de los métodos existentes, el tipo de falla único, la baja similitud y el pobre efecto visual del monitoreo del estado, donde construyen un modelo digital completo que representa todos los elementos que son parte del proceso y utilizan una plataforma de pruebas para adquirir señales reales y simuladas bajo diversas condiciones de operación, para la predicción se utilizan algoritmos estadísticos y se obtuvieron un alto índice de precisión en la predicción para la línea de producción porque al integrar la función de retroalimentación que permite tener una percepción precisa del estado actual y de los cambios futuros.

Otra de las aplicaciones más comunes que se tiene en las industrias es la implementación de DT para la optimización y mejoramiento continuo de procesos. En [56][57][22] proponen un marco general basado en la nube para apoyar los servicios de fabricación inteligente y garantizar la funcionalidad de los sistemas de control asociados. Estos puedan integrarse para mejorar los procesos mediante el rápido acceso a la información y simulación de un proceso de producción. También se evidencia que el DT puede ser integrado con los sistemas convencionales de fabricación mediante PLCs, sistemas embebidos, comunicación a la nube, y protocolos MQTT y OPC UA. Los sistemas propuestos pueden trabajar de manera independiente y los datos se envían a la nube directamente desde el controlador o mediante nodos intermedios. Además, al tener los datos en la nube, éstos pueden ser procesados y visualizados directamente en dicho entorno. Los resultados mostraron que la arquitectura simplifica la conectividad del sistema y reduce el costo de cálculo de los controladores mediante la utilización de nodos para realizar tareas de procesamiento más exigentes y que ésta pueda ser redistribuida en diferentes nodos para asegurar el desarrollo ágil de varias partes del sistema y un desarrollo de tareas individuales en paralelo. También se observó la viabilidad para actualizar un sistema de fabricación heredado hacia un sistema digitalizado e inteligente.

En el área de la robótica se han encontrado aplicaciones para la optimización, planificación y simulaciones de alta fidelidad para robots y sistemas de fabricación

distribuida con capacidades de replanificación sobre la marcha impulsadas por AI con el objetivo de verificar, interpretar y ejecutar de forma autónoma planes de producción. Mientras el sistema se ejecuta de forma habitual los datos siguen siendo enviados al DT el cual busca alternativas más eficientes y envía mejores soluciones al sistema MES, que actualiza el nuevo plan durante la producción. Los resultados mostraron que es viable encapsular el Digital Twin con un planificador, combinando la ventaja de las capacidades de replanificación con un sistema convencional [2][58]. Sin embargo, la mayoría de DT se han realizado para reducir el esfuerzo y tiempos en la implementación y conectividad, los cuales están enfocados en la representación de datos estructurales y no en el comportamiento acoplado en las plataformas DT existentes, por lo cual, las simulaciones no siempre están incluidos en las plataformas existentes y tampoco las representaciones basadas en modelos, lo que puede limitar las capacidades que puede brindar el DT, dificultando su uso en aplicaciones que requieren simulación o análisis semántico. Además, existen plataformas de DT como servicio (DTaaS), las cuales se centran en sistemas individuales, que se encargan de proporcionar medios para conectar simuladores a flujos de datos en vivo y actuadores[51]. La importancia de lograr la interoperabilidad entre los DT es importante para tener sistemas de transformación flexible, donde se tenga un intercambio de información bidireccional basado en archivos y aplicaciones entre DT. Se ha desarrollado una arquitectura genérica de DT, para alinearse con los estándares de la industria, como el Modelo de Arquitectura de Referencia de la Industria 4.0 (RAMI4.0). Esta arquitectura independiente de la tecnología demuestra su relevancia para la implementación orientada a un propósito de gemelos digitales distribuidos [40].

Dentro de las propuestas realizadas por otros autores se puede destacar varias tendencias, donde se observa que las arquitecturas presentadas no se rigen por un estándar para el diseño de la arquitectura. Sin embargo, al ser una tecnología que se encuentra en desarrollo existen propuestas abiertas tanto para el diseño de las entidades digitales, comunicación y recolección de datos. Por otro lado, la norma ISO 23247 vigente desde el año 2021 para el desarrollo de DTs en la industria no presenta restricciones respecto al uso de tecnología, plataformas y protocolos de comunicación.

La academia y la industria continúan en la implementación de nuevas propuestas, donde los resultados muestran un beneficio para la industria. Se observa que los protocolos más utilizados para la comunicación de los entornos físicos y virtuales son OPC UA, TCP/IP, AMQP, MODBUS y MQTT por su flexibilidad y

comunicación bidireccional, además que pueden ser utilizados en diferentes niveles de la pirámide de automatización permitiendo una integración total en los procesos.

## **1.7. Norma ISO 23247**

La norma ISO 23247 define un marco de referencia para respaldar la creación de DT de elementos de fabricación observables que incluyen personal, equipo, materiales, procesos de fabricación, instalaciones, entorno, productos y documentos de respaldo [10]. Proporcionando un modelo de referencia basado en entidades para el diseño, implementación y operación de DT en entornos industriales.

La norma ISO 23247 fue creada en el año 2021 e incluye una arquitectura de referencia que identifica las funcionalidades de los DT en la fabricación y las encapsula en las denominadas entidades funcionales. El objetivo del estándar es proporcionar una visión más clara para diseñar arquitecturas y las características principales que estas deben cumplir, sin embargo, es un marco abierto que no limita protocolos ni tecnologías que puedan ser utilizadas en la implementación, depende de los estándares y tecnologías disponibles para modelar los elementos de fabricación observables donde diferentes dominios de fabricación pueden utilizar diferentes estándares de datos. Su enfoque garantiza la interoperabilidad, escalabilidad y eficiencia en procesos de manufactura con el objetivo de incrementar la productividad, optimizar la toma de decisiones y la reducción de costos operativos.

La ISO 23247 proporciona un marco estandarizado que proporciona pautas y métodos para garantizar la interoperabilidad, escalabilidad, eficiencia y toma de decisiones en los procesos de fabricación. Los alcances de las cuatro partes se muestran a continuación:

ISO 23247-1: Principios, conceptos, limitaciones y requisitos generales para el desarrollo de gemelos digitales en la fabricación.

ISO 23247-2: Arquitectura de modelos de referencia basado en dominios y entidades con vistas funcionales de referencia.

ISO 23247-3: Una vista funcional del modelo de referencia basado en entidades con elementos finitos específicos. Atributos de información para elementos de fabricación observables.

ISO 23247-4: Comunicación del dispositivo, requisitos técnicos para el intercambio de información y protocolos entre entidades dentro de la arquitectura de referencia.

Sin embargo, a pesar de existir una norma se ha observado que la norma ISO 23247 no se está considerando en la mayoría de las arquitecturas actuales que han sido implementadas [59]. Se ha visto que las arquitecturas que se están utilizando constan principalmente de 4 capas que se muestran a continuación; (1) la capa física que está representada por todos los componentes físicos como estructuras, equipos, sensores, actuadores, etc., (2) la capa de datos que es la encargada del acceso y toma de datos, así como de su almacenamiento y gestión mediante protocolos de comunicación, redes, IoT, bases de datos, etc., (3) la capa virtual, que contiene los modelos digitales de los sistemas físicos, donde se realiza la simulación, la optimización y la mejora en la toma de decisiones y finalmente (4) la capa de aplicación, que es la encargada de interactuar con el usuario, proporcionando información en tiempo real del proceso.

## **1.8. Norma ISO / IEC / IEEE - 42010 & IEEE - 42020**

Los requerimientos actuales que demanda una sociedad que atraviesa un cambio constante y rápido desarrollo tecnológico, ha creado sistemas complejos, los cuales han crecido hasta un nivel sin precedentes, estos cambios generan oportunidades y también se presentan desafíos constantes que deben ser abordados por las organizaciones que crean, comercializan y utilizan sistemas. Por estos motivos es necesario cumplir con normas y criterios estandarizados al momento de implementar o diseñar, procedimientos, conceptos y herramientas para la creación de arquitecturas en diferentes sistemas, con la finalidad de tener arquitecturas más efectivas y con una mayor madurez.

Actualmente el hablar de arquitecturas son aspectos que se consideran a diario en proyectos y empresas, donde el uso de estos marcos se ha convertido en una práctica común en todos los ámbitos comerciales, gubernamentales, civiles y militares. Estas normas se aplican cada vez más en todas las áreas como: empresas, líneas de producción, servicios, datos, sistemas, funciones comerciales, áreas de misión, elementos de software, etc [60].

Al tener entidades cada vez más complejas, se evidencia que mediante el uso de arquitecturas. donde se refiere al caso general donde implica los conceptos y propiedades fundamentales que debe tener una entidad, con el objetivo de tener

un mayor orden y gestión de los sistemas, logrando estandarizar las actividades y tareas de manera mas efectiva y eficiente.

### **1.8.1. Norma IEEE 42010**

Es una norma internacional que especifica los requisitos para la estructura, gestión y descripción de la arquitectura para varias entidades donde se incluye: software, hardware, sistemas, bienes, servicios, empresas, productos, tecnologías y dominios comerciales [61].

El estándar abarca los siguientes puntos: (1) definición de los componentes principales y su interacción con los entornos, (2) representación de la arquitectura, considerando diferentes perspectivas con el objetivo de satisfacer a las partes involucradas, (3) especificaciones de la arquitectura mediante la documentación estandarizada y clara y (4) gestión de la arquitectura, para garantizar el diseño propuesto en todos los sistemas.

Además, la arquitectura de una entidad de interés establece las propiedades fundamentales de la entidad en función del entorno. Dicha arquitectura puede referirse a uno o a todos los elementos de la entidad: elementos constituyentes, comportamiento y estructura, interacciones entre los elementos, e interacciones o interrelaciones con los entornos.

### **1.8.2. Norma IEEE 42020**

Complementa la norma IEEE 42010 centrándose en los procesos de arquitecturas para la ingeniería, con el propósito de establecer el estándar para la gestión, conceptualización, colaboración, evaluación, gobernanza y elaboración de arquitecturas para dichos procesos, con el objetivo de mejorar el comercio y aplicación de sistemas, productos y servicios.

Los procesos especificados en esta norma se aplican en el contexto de: (1) establecer la comprensión, evolución, diseño, implementación, operación, mantenimiento, desinstalación de sistemas, (2) tipo de arquitectura, (3) organizaciones de usuarios, clientes y proveedores y (4) arquitectura de entidades [60].

Dentro de los principales beneficios que tiene el uso de la arquitectura se tiene: mejora la identificación de los roles y competencias requeridas, facilita la supervisión, planificación, implementación, gobernanza, gestión y mejora el seguimiento de la arquitectura.

## 1.9. Entornos inmersivos

El rápido crecimiento tecnológico ha creado nuevas herramientas y sistemas para la interacción entre humanos y un mundo ciberfísico. Dentro de estas se tiene el desarrollo de los entornos inmersivos (Realidad Virtual y Realidad Aumentada) los cuales se destacan por la capacidad de transformar e interactuar entre los mundos físicos y virtuales. Estas tecnologías han sido utilizadas en diferentes áreas como educación, industria, medicina, capacitación, aeronáutica juegos, agricultura, ciudades inteligentes, etc., dónde se ha visto las grandes capacidades de interacción que ofrece para el ser humano y la amplia posibilidad de aplicaciones.

También se observa que el acceso a esta tecnología está aumentado por la alta disponibilidad y aparición de nuevos fabricantes, los cuales han creados dispositivos con altas características de inmersión e interacción y a su vez los costos han disminuido, con lo cual el acceso es cada vez más fácil y a su vez aumenta la gama de aplicaciones que pueden ser creadas. Los beneficios y amplia gama de aplicaciones también han llamado la atención de la industria manufacturera donde estas tecnologías pueden ser utilizadas para la mejora de los procesos y capacitación de personal.

La realidad aumentada es una tecnología que permite la visualización de información digital sobre el mundo físico, brindando a los usuarios la oportunidad de observar información adicional e interactuar con estos datos en tiempo real y tiene un fácil acceso a las aplicaciones, estas pueden ser visualizadas mediante gafas o teléfonos móviles. Gracias a estas características y fácil acceso es una tecnología que conocen la mayoría de las personas y se encuentran aplicaciones en todas las áreas y para todas las edades. En la industria, la AR está siendo utilizada principalmente en área como la colaboración entre humanos y robots, mantenimiento, gestión de inventarios, montaje, reparación, inspección de productos, y supervisión y capacitación [62].

La realidad virtual es una simulación generada por computadora de un entorno 3D interactivo e inmersivo, donde los usuarios tienen la oportunidad de explorar, interactuar y manipular los objetos del entorno creado. Desempeña un papel importante en la I4.0, donde la convergencia de las tecnologías digitales y el mundo físico transforma los procesos y operaciones industriales [63]. Estos escenarios son creados de acuerdo con las necesidades y pueden ser complementados con tecnología háptica para mediante el movimiento de las manos tener una mayor

inmersión. En la figura 1.5 se puede observar los entornos inmersivos y su detalle para AR y VR.

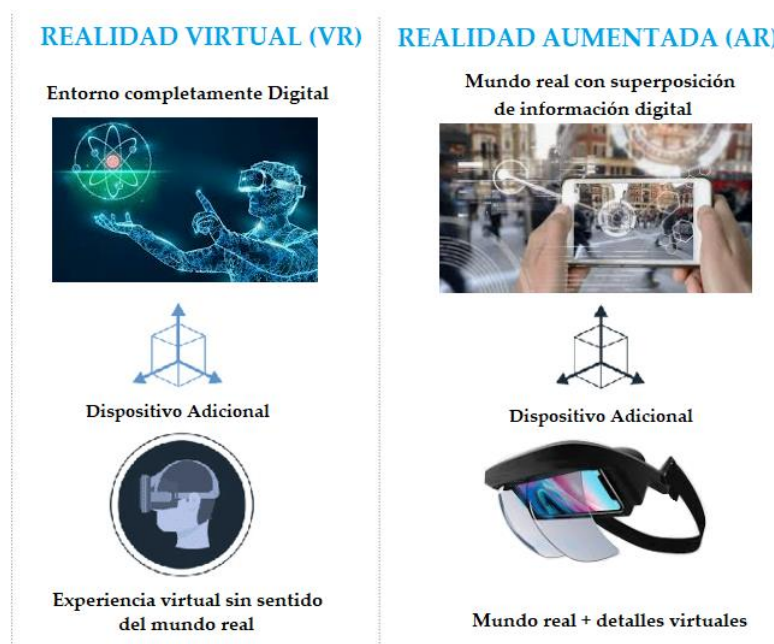


Figura 1.5 Entornos inmersivos, Realidad Virtual y Realidad Aumentada

Vincular DT con entornos AR y VR implica la integración de datos, tecnologías, plataformas y protocolos de comunicación, donde se crea una conexión entre los mundos virtual y físico. Estas tecnologías se están convirtiendo en un elemento clave para el desarrollo de la I4.0 aunque aún no se ha definido una arquitectura estandarizada para su desarrollo implementación. Permiten mejorar el diseño de nuevos procesos y productos en las etapas iniciales de desarrollo, monitorear los procesos productivos existentes y crear modelos digitales de procesos existentes integrados dentro del CPS que contribuyen a aumentar la calidad, reduciendo los costos de producción y mantenimiento preventivo.

A medida que las barreras que se tienen entre la vida real y los entornos virtuales van disminuyendo debido al desarrollo tecnológico y adaptación rápida del ser humano con los mismos, los investigadores buscan formas de integrar estos entornos con la finalidad de aportar a las vidas humanas en la mayoría de sus aspectos. Estas tecnologías están bien alineadas con la fusión de objetos reales y virtuales para mejorar la capacidad del ser humano e interactuar con los DT y gestionarlos en una amplia gama de aplicaciones, que van desde la educación, la medicina, la capacitación, ciudades inteligentes, la investigación, la, construcción, la seguridad, la productividad, etc.

La integración de estas tecnologías inmersivas en conjunto con el DT amplía los beneficios en el sector industrial, principalmente en la visualización, capacitación, interacción, toma de decisiones y simulación anticipada en función de los datos registrados constantemente que permite la actualización de parámetros del entorno digital.

Dentro del desarrollo del DT con entornos inmersivos se tienen propuestas como en [62][23][21] donde plantean el uso de tecnologías con AR y VR para desarrollar una interfaz hombre-máquina para el monitoreo remoto de sistemas ciberfísicos industriales y de esta manera ampliar las capacidades del DT, además, se observa que los principales temas de investigación están centrados en la visualización de datos, capacitación y la interacción con los DT a través de estos entornos. Dentro de las implementaciones fueron realizadas en líneas de ensamblaje, y para el diseño utilizó Unity para crear una aplicación inmersiva, además se utilizaron dispositivos industriales en combinación con sistemas embebidos de bajo costo para el control y comunicación de los entornos mediante protocolos OPC UA, MQTT, Node Red y Modbus. Esta implementación ofrece una alta interacción con los entornos virtuales que permiten realizar ajustes oportunos y dinámicos en tiempo real, mejorando la eficiencia de los procesos industriales, además, se observó que el sistema ofrece mayor flexibilidad para acceder a la información generada a través de estos entornos inmersivos permitiendo nuevas oportunidades para visualizar los estados de monitoreo. Sin embargo, se evidencia que la combinación de estas tecnologías aún se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo, lo que deja abierto la brecha para encontrar nuevas oportunidades para un mayor desarrollo de la combinación de estas tecnologías. Actualmente está centrada para facilitar la comprensión, visualización de los procesos y obtención de datos y posteriormente puedan ser utilizados como insumos para la toma de decisiones en función de las dinámicas cambiantes de los procesos.

La unión de estas tecnologías tiene un potencial de crecimiento significativo y se espera que aborde significativamente a los siguientes puntos [64].

- Mejorar el realismo y la interactividad en los entornos 3D: el objetivo es mejorar los aspectos visuales mediante una mejor renderización de imágenes y así crear ambientes más interactivos para hacer que las experiencias virtuales sean más realistas, amigables y atractivas para los usuarios.

- Refinar las simulaciones de DT: mejorar los tiempos de comunicación y sincronización de ambientes para aumentar la precisión y la funcionalidad de los DT.
- Mejorar la accesibilidad: brindar más información y capacitación sobre estas tecnologías para que sean más accesibles para un público más amplio, y todos puedan aprovechar las oportunidades que ofrecen.
- Mejorar la visualización para evitar el mareo por movimiento en los entornos virtuales: analizar nuevas formas de interactuar o mejorar las gafas de AR o VR para que generen ambientes realistas y a su vez disminuya los problemas del mareo por movimiento y de esta manera romper las brechas que tienen algunas personas al usar estos dispositivos en varios campos.

Aunque la importancia del DT es evidente, no está claro ni definido ninguna arquitectura específica para construirlo y usarlo en la fabricación inteligente. La literatura no proporciona una definición única y no existe una comprensión completa ni un modelo unificador. Esto se puede deber a la alta complejidad de representar y modelar los procesos físicos que intervienen en las diferentes etapas de producción, por la complicación de mantener los modelos digitales actualizados, incluidos los cambios realizados durante la línea de producción para lograr una convergencia entre el mundo físico y el digital.

Luego de observar los beneficios y desafíos de la implementación de Digital Twin en la industria y además identificar la disponibilidad de tecnologías habilitadoras y recursos disponibles en la industria 4.0, la motivación de esta investigación es **plantear una arquitectura que integre los Digital Twin con las tecnologías inmersivas** para el monitoreo y control de procesos industriales bajo el estándar ISO-23247 en procesos 4.0 con comunicación bidireccional. Por lo tanto, la propuesta presentada muestra una arquitectura que detalla el desarrollo de un Digital Twin inmersivo en entornos industriales y las especificaciones mínimas que se deben considerar en cada etapa de la implementación bajo la norma ISO-23247, con comunicación bidireccional entre las entidades físicas y virtuales para tener una integración horizontal y vertical del proceso que comprenda desde el nivel de gestión hasta el nivel de campo.

## 1.10. Objetivos

En el presente trabajo se centrará en la integración de nuevas tecnologías, conceptos y aplicaciones industriales. Para plantear la implementación de arquitecturas para el diseño de sistemas basados en Digital Twin inmersivos aplicados al monitoreo y control de procesos industriales.

Objetivo Principal:

Definir una arquitectura que permita la integración bidireccional industrial basada en CPS con DT para el control de procesos mediante la utilización de dispositivos de bajo coste y entornos inmersivos.

Objetivos Específicos:

- Revisar información relevante del estado del arte de Digital Twin para aplicaciones de industria 4.0 y mejora de procesos mediante la búsqueda en bases de datos.
- Desarrollar una arquitectura para la monitorización y control de procesos en tiempo real, basado en la creación de Digital Twin con una interfaz de realidad virtual y aumentada inmersiva para la simulación, control y análisis del proceso.
- Implementar una comunicación industrial bidireccional entre el DT y el CPS para actualizar los parámetros del modelo en base a la información extraída del proceso en tiempo real con capacidad de toma de decisiones sobre los sistemas y equipos físicos.
- Integrar las arquitecturas basadas en DT para la monitorización y control del CPS en un entorno de fabricación (MPS 500) real con dispositivos de bajo coste que permitan interactuar y administrar los datos del proceso.

## 1.11. Hipótesis

Dentro de las preguntas se tiene: ¿Cómo las arquitecturas de sistemas basados en Digital Twin inmersivos pueden mejorar el control, el monitoreo y toma de decisiones en los procesos industriales?

Se plantea la hipótesis de que la arquitectura propuesta para la implementación del Digital Twin inmersivo basada en la norma ISO 23247 permitirá la integración de tecnologías como (AR, VR, IoT, CPS, MES) para incrementar las capacidades del DT brindando mayores beneficios a los usuarios a través de una interacción

amigable y flexible entre entidades físicas y virtuales, con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa de los procesos y la toma de decisiones en entornos industriales en tiempo real.

La hipótesis se basa en la integración de Digital Twin con entornos inmersivos para mostrar que es posible potenciar los beneficios del DT en procesos industriales 4.0. En otros trabajos se muestran implementaciones de DT en la industria, sin embargo, no se han enfocado en el uso de normas para el diseño de la arquitectura como es ISO 23247 la cual fue desarrollada para establecer parámetros generales que debe tener el DT para la aplicación en proceso industriales.

El rápido desarrollo de las tecnologías habilitadoras para la I4.0 ha generado que las industrias y la academia centren su atención para la aplicación e integración de éstas. Sin embargo, una migración de la industria convencional a la industria 4.0 ofrece muchos beneficios y a su vez presenta desafíos por los costos que representaría la implementación de estos sistemas. Entre las tecnologías habilitadoras se tiene que el DT es camino para una integración ciberfísica completa. porque facilita la integración del conocimiento humano-máquina en diferentes contextos industriales, sin embargo, al ser una tecnología en desarrollo se va a realizar la unión con tecnologías inmersivas y protocolos estandarizados para brindar un camino en la implementación de dichos sistemas. Además, se debe considerar que dentro de los desafíos está la necesidad de integrar equipos heredados con equipos de nueva generación utilizando plataformas de diferentes proveedores y que a su vez permitan una integración horizontal y vertical de nuevos sistemas.

En resumen, la contribución central del presente trabajo es la implementación de una arquitectura bajo la norma ISO 23247 para el monitoreo y control de procesos industriales basados en un sistema MES y DT inmersivos. Para el diseño de la arquitectura se utilizarán tecnologías de sistemas CPS, MES, robótica, IoT, AR, VR y protocolo de comunicación OPC UA.

Con el objetivo de integrar dichas tecnologías y potenciar las funcionalidades del DT brindando mayores prestaciones para los usuarios y clientes, posteriormente se realizará la validación de la propuesta mediante pruebas experimentales en el laboratorio de industria 4.0 para verificar el correcto funcionamiento y mostrar las ventajas y desafíos que presenta el DT inmersivo en una línea de producción continua.

## 2. Metodología

Las metodologías propuestas para desarrollar el Digital Twin inmersivo ofrecen varias ventajas entre las cuales se tiene: proporciona una comprensión más completa del proceso modelado, interacción en tiempo real y visualización dinámica de los entornos y toma de decisiones informadas. Estas características conducen a un mejor control del proceso, una resolución de problemas más rápida y una eficiencia general optimizada.

La novedad del presente trabajo radica en no sólo centrarse en obtener el modelo del sistema industrial e integrar sistemas inmersivos sino también en resaltar y mostrar los beneficios de integrar otras tecnologías, protocolos y servicios habilitadas por la I4.0 para potenciar las capacidades del DT. La principal contribución de esta investigación es el diseño e implementación de una arquitectura para Digital Twin inmersivos que proporcione un entorno industrial realista donde se puedan integrar varias tecnologías habilitadoras y se integren perfectamente para interactuar con equipos reales y mejorar los procesos en la industria.

En el presente trabajo se utilizarán los métodos investigativo y experimental, con el propósito cumplir con los objetivos del presente estudio. Con el método investigativo se realizará el estado del arte para definir los requisitos de la tesis, mediante la búsqueda y la recolección de la información necesaria para definir los alcances y objetivos de la presente investigación y una vez fundamentados los conocimientos iniciar con el desarrollo de la propuesta. En la revisión se investigará estudios previos de arquitecturas propuestas y tecnologías utilizadas por otros autores, para identificar las mejores propuestas en función de los resultados obtenidos, además, permitirá conocer los requisitos y funcionalidades que deben tener estos sistemas para la implementación en el sector industrial. Además, se revisará los estándares disponibles que se pueden aplicar para el diseño de arquitecturas del DT, así también se buscare normas para el diseño de arquitecturas a nivel general aplicado al sector industrial.

Una vez que se han identificado las necesidades operativas y tecnológicas que debe tener el DT se realizará el diseño de la arquitectura que sea flexible y robusta para la implementación del DT en la industria, donde se realizara la definición de los componentes técnicos como: tecnologías, plataformas, dispositivos, protocolos de

comunicación y estándares que se van a utilizar. El marco propuesto debe considerar una arquitectura escalable y modular que permita la integración de tecnologías inmersivas y diferentes protocolos de comunicación.

Mediante el método experimental se realizará la implementación e integración de la arquitectura propuesta con todos los componentes, tecnologías y dinámica del proceso para toda la línea de producción, donde se realiza la creación del entorno digital con características idénticas al proceso físico y se establece la comunicación bidireccional entre las entidades. Posteriormente se realiza la programación y configuración de los diferentes sistemas para la obtención de datos, procesamiento, simulación y monitoreo en tiempo real del proceso, además, de asegurar la interoperabilidad entre sistemas e integración entre las diferentes tecnologías y a su vez permita la implementación de tecnologías inmersivas.

Finalmente se realizará la evaluación y validación de la propuesta mediante la implementación de diferentes casos de estudio en las líneas de producción. Se realiza pruebas de usuarios mediante la interacción para evaluar la experiencia y funcionalidad, análisis del desempeño del sistema mediante medición de tiempos de respuesta y tiempos de producción para analizar el rendimiento, y pruebas de simulación en función de los datos obtenidos en tiempo real. Estas pruebas se realizarán en los sistemas tradicionales y sistemas con DT inmersivos para analizar una posible mejora e interacción con los entornos.

#### Diseño de la investigación

- Recopilación de información necesaria en tesis y papers para iniciar el desarrollo del estudio mediante la revisión del estado reciente de las arquitecturas, tecnologías habilitadoras y desafíos para el desarrollo de DTs en la industria.
- Diseño de una arquitectura basado en Digital Twin inmersivos para el monitoreo y control de procesos en tiempo real, se realizará el análisis de tecnologías, normas, protocolos, software y hardware disponibles para el diseño e implementación.
- Establecer una comunicación bidireccional entre las entidades físicas y virtuales del proceso para actualizar los parámetros del modelo en base a la información extraída del proceso en tiempo real con capacidad de toma de decisiones sobre los sistemas y equipos físicos.

- Integrar las arquitecturas basadas en Digital Twin inmersivo para el monitoreo y control en un entorno de fabricación con dispositivos de bajo coste que permitan interactuar y administrar los datos del proceso para la simulación, control y análisis del proceso.

Los recursos disponibles para la investigación son los laboratorios (Estación de Producción Modular “MPS-500” e Industria 4.0 “CP Lab & CP Factory”) de la Universidad Politécnica Salesiana (Quito - Ecuador), PLC, sistemas embebidos, gafas de AR y VR de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización.

Para identificar las principales funcionalidades de las arquitecturas se requiere identificar los requisitos y desafíos de la industria al aplicar la tecnología DT a lo largo del ciclo de vida del producto. Además, es importante evaluar la integración de estas tecnologías por lo que se realiza una implementación con equipos reales y para la evaluación de resultados de la arquitectura propuesta se van a utilizar 3 casos de estudio diferentes con los enfoques que se detallan a continuación.

1. Validación de los entornos inmersivos (AR, VR, Senso Glove) en conjunto con el DT, mediante la interacción en tiempo real con los elementos de la célula de fabricación para la supervisión, simulación y control de parámetros.
2. Establecer un flujo de producción continua y posteriormente el operador genera errores internos y externos controlados para de esta manera probar que el DT genere una alerta inmediata del error y la ubicación.
3. Medición de los tiempos del proceso entre el sistema convencional y el sistema con del DT inmersivo, luego del establecimiento de las condiciones más óptimas obtenidas con los modelos de simulación del DT.

### 3. Publicaciones

Para el desarrollo de la presente investigación se han realizado varias publicaciones, sin embargo, se van a detallar las 3 publicaciones que aportan de manera directa al cumplimiento de los objetivos y por ende al desarrollo de la tesis doctoral. Estas publicaciones cumplen con todos los requisitos establecidos por la institución y se muestran en la tabla 3.1. En las siguientes secciones se añade los artículos en idioma inglés debido a que las publicaciones fueron publicadas en dicho idioma.

Tabla 3.1 Publicaciones realizadas

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Revista</b>	<b>DOI</b>
Caiza Gustavo & Ricardo Sanz	Digital Twin to Control and Monitor an Industrial Cyber-Physical Environment Supported by Augmented Reality [65]	Applied Sciences	<a href="https://doi.org/10.3390/app13137503">https://doi.org/10.3390/app13137503</a>
Caiza Gustavo & Ricardo Sanz	Immersive Digital Twin under ISO 23247 Applied to Flexible Manufacturing Processes [66]	Applied Sciences	<a href="https://doi.org/10.3390/app14104204">https://doi.org/10.3390/app14104204</a>
Caiza Gustavo & Ricardo Sanz	An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes [67]	Applied Sciences	<a href="https://doi.org/10.3390/app14104125">https://doi.org/10.3390/app14104125</a>

#### 3.1. Digital Twin to Control and Monitor an Industrial Cyber-Physical Environment Supported by Augmented Reality.

La publicación (1) contribuye directamente al cumplimiento de los objetivos de la investigación. Brinda un primer enfoque para el diseño e implementación de un DT inversivo en procesos industriales mediante la integración de tecnologías y comunicación bidireccional como se detalla a continuación.

Abstract: Increasing industrial development and digital transformations have given rise to a technology called Digital Twin (DT) that has the potential to break the barrier between physical and cyberspace. DT is a virtual and dynamic model enabled through a bidirectional data flow that creates high-reliability models with interconnection and fusion between the physical and digital systems for full integration. In smart manufacturing, this technology is increasingly used in research and industry. However, the studies conducted do not provide a definition or a single integrally connected model. To develop the Digital Twin shown in this research, the literature was reviewed to learn about the enabling technologies and architectures used at the industrial level. Then, a methodology was used to obtain the physical process information, create the digital environment, communicate the physical environment, apply simulation models in the digital environment, and parameterize the simulation environment with the physical process in real-time to obtain the Digital Twin supported with augmented reality. The system was implemented in the MPS-500 modular production station that has industrial sensors and actuators. The virtual environment was designed with Blender and Vuforia to create the augmented reality environment. In the proposed methodology, robust devices (field and control level) and low-cost embedded systems were used for the creation and communication of the virtual environment (monitoring and control); for the joint work of these technologies, they were carried out through the use of the following protocols: Open Platform Communications United Architecture (OPC UA), Ethernet, and machine to machine (M2M), with which a communication was achieved between the different levels of the automation pyramid. The results show that the proposed methodology for the implementation of the DT allows bidirectional communication between the physical and virtual environment and can also be visualized with the support of AR, thus providing its characteristics to the proposed DT. Digital Twin is an essential factor in creating virtual environments and improving applications between the real and digital world, establishing a bidirectional communication through the Ethernet protocol, with a communication time of approximately 100 ms. This technology interacts with the virtual environment and performs mappings, thus achieving timely and dynamic adjustment. This improves data management and production and incorporates process simulation and physical control in real-time, allowing to execute and trigger actions in the physical equipment simultaneously.

### 3.1.1. Introducción “publicación (1)”

Advances in manufacturing technologies and digital transformation are changing the industrial sector worldwide, implementing new concepts and cutting-edge technologies such as the Internet of Things (IoT), Big Data (BD), Cyber-Physical Systems (CPS), Cloud Computing (CC), and Artificial Intelligence (AI) [1]. These technologies have greatly stimulated the development of smart manufacturing, also called Industry 4.0, where there is greater data management that allows factories to save time, improve productivity, customize products, and respond flexibly to current requirements. Due to disruptions caused by the COVID-19 pandemic, most industries are considering a foray into Industry 4.0, taking advantage of its benefits to simulate working conditions in real-time, operate production systems remotely, and maintain sustainable operations [2].

Cyber-physical systems are a promising tool to transform many application fields positively. However, they are also a great challenge because there is much to be explored and discovered regarding cyber-physical integration for achieving smart manufacturing [3]. Currently, digital models used for process simulation are stored as cloud services. Due to updates or latency, these models may not reflect the actual state of the physical system, resulting in inaccurate simulation and control [4]. The industrial revolution has given rise to an emerging concept called DT that has the potential to break the barrier between physical and cyberspace in smart manufacturing [5,6]. It integrates CPS information and fuses heterogeneous data from multiple sources, facilitating the connection between virtual and actual data [7,8]. This technology can improve the integrity and feasibility of process planning, through training artificial intelligence and 3D computer-aided (CAD) models, and then build an evaluation and optimization twin for the transformation of theoretical processes into practical operations, improving the viability and effectiveness to optimize processes, and providing a friendly interface. DT is one of the main concepts associated with Industry 4.0.

However, in the scientific literature, there is no single definition for this concept [9,10], no complete understanding, and no unifying model [11]. Studies show that DT still needs to form an integrally connected technology and is still in its early stage of development [12]. So far, very little research has been conducted in the industry because it is difficult to analyze and estimate the structural and environmental parameters in real-time considering dynamic changes, and also due to the high complexity of representing and modeling the physical processes

involved in the production stage [13]. One of the main challenges is the need to monitor and interact with the physical entity to concentrate the functionalities of a highly reliable system that bridges and integrates the physical and virtual worlds [14]. In the industrial field, AR is a complementary technique that helps operators perform tasks such as assembly, assistance, visualization, and interaction. This technology also allows operators and technical personnel to manage industrial variables in a more dynamic and less risky way; it is also used for the maintenance and programming of industrial machinery. Augmented and virtual reality, also known as “extended reality” (XR), offer a new set of 3D applications that may revolutionize the factories of the future, enabling the development of novel virtual applications that included improved forms of collaboration, efficient training processes, and improved productivity [15].

AR allows the improvement of the visualization and interactivity effects, where the Digital Twin receives data from sensors and controllers. Its main features include real-time monitoring, reprogramming, offline simulation, virtual test bench for optimization, and operator training, improving traditional methods because more accurate data and timely responses to dynamic process events can be obtained. AR and DT are tools that facilitate the fusion of the virtual and the physical and have shown a growing interest in the area of research and industry under the wave of the human-centered concept such as Industry 5.0, being one of the enabling technologies that can positively influence the man–machine relationship [16]. Several authors have conducted research in these areas to show their potential and have presented various methodologies, such as in [17], which presents a dynamic system for operators of “virtual eyes and hands” in the physical system; each system produces and consumes services to have interoperability, that is, it has heterogeneous and remotely accessible web services, and also a middleware to allow interaction with existing legacy systems (SCADA, ERP). Reference [18] presents an implementation of an architecture that covers four production stages, namely: design, operation, optimization, and validation, and implementation where a model is created to simulate the behavior of the physical system, and later bidirectional communication between the real world (PLC) and the virtual model is established. In [19], they propose a semi-automatic methodology to generate a DT of an industrial process that consists of extracting information from the diagrams and converting the information to a graphical format to generate a simulation model, then configure and parameterize the

simulation model according to process data to obtain a Digital Twin. The results of several works implemented in the industry have shown an improvement in the productivity of the processes and quality standards, in addition to having the capacity for simulation, adaptive automation, and evaluation of new technologies without disturbing the production of the plant using industrial protocols such as OPC-UA.

The DT concept, introduced with the Industry 4.0 revolution, will continue to change many areas of our lives [20]. Several enabling technologies contribute to creating the Digital Twin of a physical process by collecting different data sets to develop updated digital simulation models based on the generated knowledge, implement optimization strategies, and evaluate the behavior of the physical environment [21]. By 2025, the global market is expected to reach USD 26.07 billion, with an annual growth rate of 38.2% [22], which will bring significant changes in many areas of our lives. Several pioneering companies in developing products for industrial automation are working to create Digital Twins—for example, General Electric, Hirotec Corporation, Rockwell Automation, ABB, Siemens, etc. [23].

The development of DTs supports the growing and accelerating demand for industrial evolution, increasing functionality, reliability, self-prediction, and autonomy to react to unexpected events [24]. Although DTs are very important, a methodology has yet to be defined to create and use them in smart manufacturing [25]. It is evident that there are several works carried out; however, there are no established methodologies or protocols to implement DT in the industry, for which the present work seeks to contribute with new proposals combining industrial hardware and software with embedded systems and immersion technologies.

This research shows the development of a Digital Twin applied to an industrial process. A methodology was used to obtain the physical process information, create the digital environment, communicate the physical and real environment, apply simulation models in the digital environment, and parameterize the simulation environment with the physical process in real time to obtain the Digital Twin. The article has several sections; Section 2 shows the key concepts for the development of DT; Section 3 shows the design and implementation of the DT; Section 4 shows the results and discussion; and Section 5 shows the conclusions.

### 3.1.2. Trabajos Previos “publicación (1)”

During the last decade, researchers have been working on the development of DT due to its characteristics and functionalities shown; however, in the industrial area, there are many challenges still existing mainly in undefined methodologies and architectures. Below are several works carried out in the industry with DT at the implementation and simulation level.

Among the industry 4.0 applications, there are many related works, where authors have conducted studies using different enabling technologies to create the virtual model of the process. For example, refs. [26–28] shows a path for creating completely functional DTs where continuous production systems are used to reproduce their physical features for registration, inspection, and digital communication. The objective is to have a structure without automation and obtain the data to perform a virtual analysis of various parameters such as predictive maintenance, dynamics, multiservice platform, configuration, and adaptation with high-efficiency automatic systems that are compatible with the planning system and the ERP (Enterprise Resource Planning) to obtain clients’ requirements and gradually develop the automation, to achieve better planning and cost reduction. In addition, the scenarios of industry 4.0 DT applications will enable the creation of vertical and horizontal life cycle integration concepts. Different architectures with DTs have been proposed for the design and improvements of CPS. An open-source modular and flexible architecture is developed in [29] for process control, light protocols, and flexible tools for 3D modeling and visualization. The tools were chosen to model and represent machinery and production systems.

The virtual environment converges with reality, producing reliable data to validate execution time and enable the implementation of actions on the real plant based on data obtained through simulation. A CPS is created in [30] for the design and control using three enabling technologies: fast mapping method of distributed controllers, extensible distributed communication framework, and multiscale modeling method. Experimental results show that the CPS may achieve a fast design and distributed control for customized and flexible design. A digital mapping model of a physical production plant is realized in [31]. The model has four layers: dimension modeling, object modeling, monitoring, and prediction using the Markov chain. Results showed that the DT is the key technology in the virtual physical merging of the CPS, and in turn, increases the capabilities of operators.

A systematic method is proposed in [32] for customized production of furniture, which includes high-fidelity 3D modeling, modeling of mechanisms to simulate movement, and data synchronization in real-time. Results showed that product quality and efficiency may

be improved and may achieve virtual monitoring of devices in real-time. An operational decision-making system is proposed in [33] for an industrial environment with a high variety of products and demand; for this purpose, the principles of Industry 4.0 were adapted with a DT constituted by simulation and artificial intelligence focused on the planning of operational resources and cyclic and continuous decision-making. Results showed a decrease in the number of operators and a reduction in the delivery time. A way to integrate a digital shadow (unidirectional communication) system with an MES system is proposed in [34] to create a DT that will be used for decision-making about the error state, and another to unchain low-quality dismantling processes, using the M2M communication protocol to create a communication channel between two levels and with an intelligent layer that houses rules and knowledge. The DT is simulated and integrated with the MES of the Industry 4.0 Laboratory, where the proposed frameworks have been tested and validated.

Current simulation techniques exhibit a high technological development that enables the simulation of all phases of the life cycle of an industrial process with high precision and complexity, where the algorithms proposed are executed to analyze their performance in the presence of different events. A computer simulation of discrete events through a DT is carried out in [35]; such a simulation consists of three stages: definition of future scenarios, periodic executions, and decision-making based on the integration with data in a real environment of a logistic process in the aeronautical industry. Results showed the possibility of optimizing decision-making related to supply routes and the integration of the simulation model with the ERP. A system for identifying, modeling, monitoring, and optimizing dynamic changes of small objects is proposed in [5].

A hybrid neural network model with a learning algorithm was built with the data simulated, for synchronizing the physical and virtual systems. Results show the effectiveness of the proposed method, with a higher detection precision for a DT in intelligent manufacturing. A cloud-based reference model for a CPS with DT is presented in [36]. A hybrid neural network model with a learning algorithm was built with the data simulated, for synchronizing the physical and virtual systems. Results show the effectiveness of the proposed method, with a higher detection

precision for a DT in intelligent manufacturing. A cloud-based reference model for a CPS with DT has been presented in [37]. The authors present a methodology to reduce the number of messages through the DT between the CPS components, and in this way maintain a uniform communication interface and carry out tasks securely through a classification of events for a uniform distribution and to guarantee architecture scalability.

Specific aspects and behaviors of the system are modeled in [38] to obtain information about the state or indicators through the aggregation of black-box modules to the simulation model. Results showed that it may be used to observe various aspects of the process and for updating the real system with improvements that may be obtained in the digital model. An IIoT architecture with DT is proposed in [39,40] to acquire data and features using cluster-based deep learning for anomaly detection. Results showed an improvement in learning, convergence, and energy-saving compared with various last-generation anomaly detection algorithms.

Among the different proposals presented by the authors, it is evident that one of the greatest challenges is creating reliable digital models with acceptable computational costs, low latency, and deep analysis methods. On the other hand, the opportunities open the possibility of bidirectional information transfer, diagnosis, optimization, replication of digital processes, development of intelligent systems, and predictive analysis using intelligent control techniques.

### **3.1.3. Materiales y Métodos “publicación (1)”**

The contribution of the article is: (1) A method of control and monitoring of industrial processes based on Digital Twins is proposed, where immersive technology and industrial communication protocols are integrated. (2) Integrate technologies, such as augmented reality, and the Internet of Things, to link and integrate physical and virtual environments. (3) Based on the Digital Twin model, process conditions are analyzed through virtual simulation and immersive environments for process control and monitoring (see Figure 3.1).

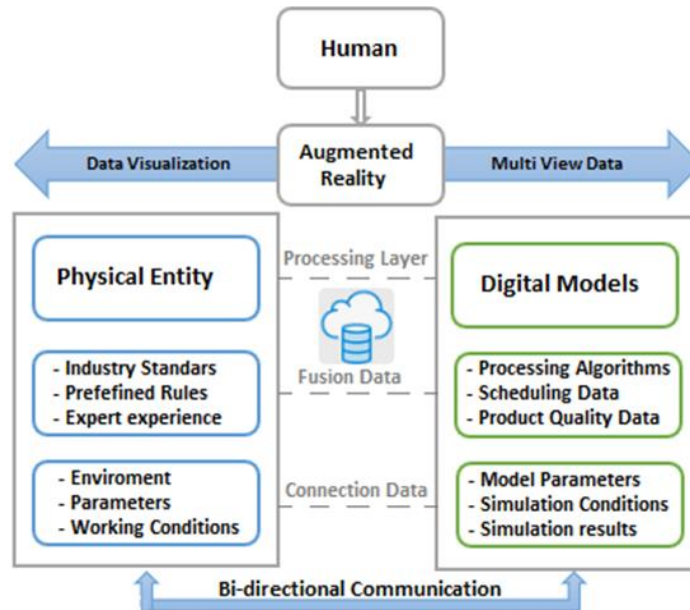


Figura 3.1 Métodos y tecnologías clave del Digital Twin.

The hardware and software used in this research are the MPS-500 modular production station that has industrial sensors and actuators to test the proposed methodology in a real environment. For the communication between the field and control level, the OPC UA protocol was used because there are devices of different brands. The PLC S7-1200 CPU 1212C is used for the DT implementation due to its versatility and Ethernet TCP/IP communication protocol. An SM 1233 digital expansion module connects the sorting station's inputs and outputs through the SysLink interface.

An Arduino mega is used with an Ethernet Shield module and a switch to establish an Ethernet TCP/IP network for communication between the virtual and the physical model. For the design of the DT, the Blender software is used, and to export and visualize with AR, it is performed using Unity version 2017.3.0f3; the META 2 glasses use the SDK "SDK2 Beta 2.4.0". Additionally, the minimum PC requirements to run the AR app are Windows 10 (64-bit), Intel Core i7 6700 or AMD FX 9590, 16 GB DDR4 RAM, NVIDIA GeForce GTX 970 or AMD Radeon R9 390X, 10 GB of hard drive space, HDMI 1.4 b video output port, and USB 3.0 or higher port.

Digital Twin: DT is a virtual and dynamic model enabled through a data flow that creates highly reliable models with interconnection and fusion between the physical system and the created digital representation. These models contain all

the information of the physical system and are fully integrated to exchange information in both directions [41,42]. The integration between IoT and data analytics simulates the physical counterpart's characteristics, behavior, and performance by prediction, optimization, monitoring, control, and decision-making in real-time [43,44]. Interoperability, interchangeability, reusability, maintainability, flexibility, and autonomy throughout the life cycle are requirements for developing a DT [45].

- i. Digital model (DM): A digital representation of a physical object that does not use automatic data exchange between the digital model and the physical object.
- ii. Digital shadow (DS): This is a DM with unidirectional automatic flow between the state of the existing physical object and the digital counterpart.
- iii. Digital twin: There is a bidirectional flow between the state of the physical object and the digital object for total integration.

**Cyber Physical System:** CPSs are multidimensional interactive intelligent systems containing a set of physical devices, communication networks, and equipment interacting with virtual cyberspace [46], representing the virtualization of real systems from smart digital copies [47]. CPSs are the new backbone of digital systems; they use electronics, software, sensors, and wired and wireless network connectivity operating at virtual and physical levels [48,49], providing an essential element for designing interactive systems within an integrated environment and enabling connectivity and synchronization in Industry 4.0.

**Industry 4.0:** CPSs, Industrial Internet of Things (IIoT), and Cloud Computing contribute to establishing the fourth industrial revolution that seeks increasingly automated, integrated, and digitized processes, offering an opportunity to significantly improve operations' quality and efficiency and enable customized production [50]. Industry 4.0 is driven by different technologies such as horizontal and vertical system integration, autonomous robots, simulation, augmented and virtual reality, IIoT, cybersecurity, additive manufacturing, big data, and analytics [51], providing autonomy, intelligence, and advanced connectivity to create an interactive and dynamic bridge between virtual systems and physical systems that are constantly changing in the industry [52]. Industry 4.0 is an emerging business paradigm that leverages the benefits of enabling technologies that drive smart systems and environments [53].

Industrial Internet of Things: IoT connects resources and collects data from the physical world. The IIoT is fundamental to Industry 4.0 as it enables the interconnection of smart heterogeneous objects (sensors, actuators, embedded systems, RFID, embedded computers, and mobile devices) through communication protocols and open interfaces [54]. This is one of the leading underlying technologies for Digital Twins [55] because it provides out-of-the-box IoT middleware solutions, allowing companies to choose open-source or licensed enterprise solutions, depending on their requirements [56].

META 2 Glasses: META 2 Glasses is a tool for interacting with Augmented Reality created in 2016. Its integrated sensors allow it to track movement in the environment. In addition, this tool facilitates the movement of virtual objects in real time with the help of fast reading of the user's hands. It is worth noting that the META 2 Glasses need to be connected to the computer via cables to achieve a correct interaction with the AR application. This tool creates an environment giving depth to the image, making the user feel part of the environment and enjoy a realistic and intuitive experience [57].

### 3.1.4. Implementación y Resultados “publicación (1)”

Figure 3.2 shows the implementation of the Digital Twin. The different components were created individually and then assembled with Unity using Blender software. An S7-1200 PLC, an embedded system, and a switch were used to establish the bidirectional communication between the physical and the virtual part. The system operates manually or automatically and provides a digital interface containing all process components. Sensors and actuators are connected to a remote I/O interface for sending and receiving process data to the digital environment, following the OPC UA protocol for communication.

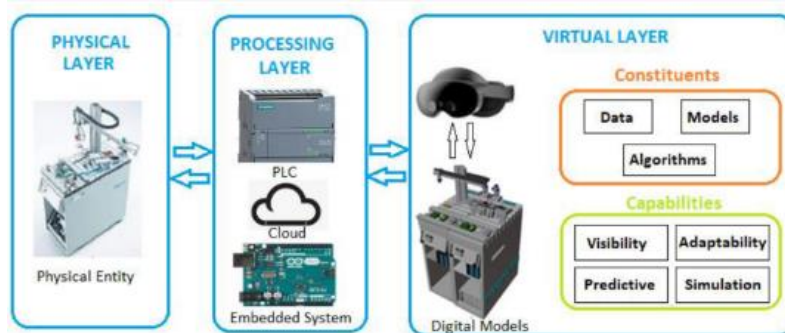


Figura 3.2 Esquema general del Digital Twin.

## Communication

The communication protocol used is Modbus TCP/IP, and its configuration is shown in the class diagram in Figure 3.3. First, the Arduino encodes and decodes the data sent, for which the Ethernet and Modbus libraries are installed, and then the variables for sending and receiving data are created. Then the IP network, MAC, Gateway, and Subnet are configured, and the registers are started to send the data bi-directionally between the PLC and Unity.

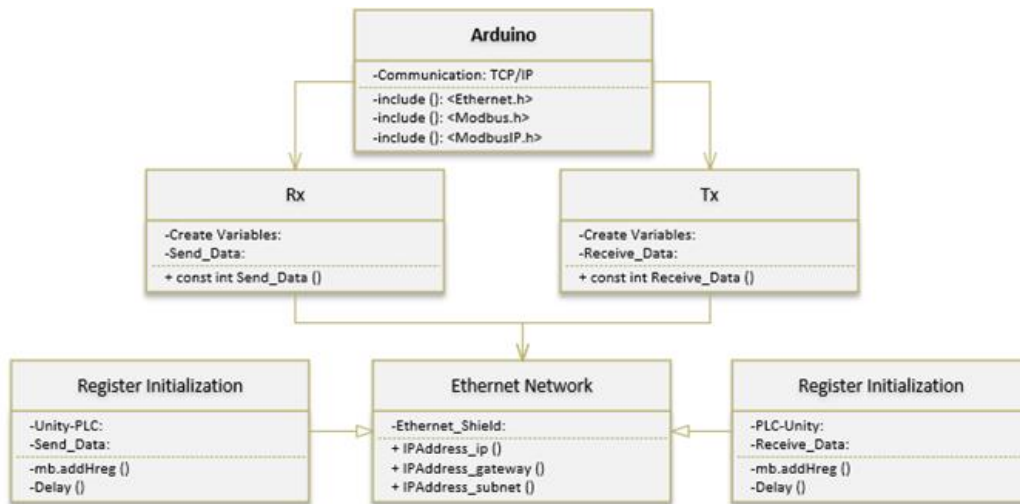


Figura 3.3 Diagrama de clases de la etapa de comunicación.

Subsequently, the TIA Portal software is programmed with the configuration of the Modbus network parameters to send and receive data between PLC S71200 and Arduino. The programming in the TIA Portal software is performed in Ladder language, while in Arduino, the reading and writing of the registers are performed through Modbus communication. The data blocks (DB) are configured for sending and receiving data in each direction, as shown in Figure 3.4 (a). Finally, serial communication between Unity and the embedded system is established. To achieve this, programming is performed in Visual Studio to develop serial communication, COM port assignment, and speed. The variables to transmit and store data are also created, and the digital and physical environment movements supported by augmented reality are interpreted. Figure 3.4 (b) shows the class diagram of the configuration in the TIA Portal.

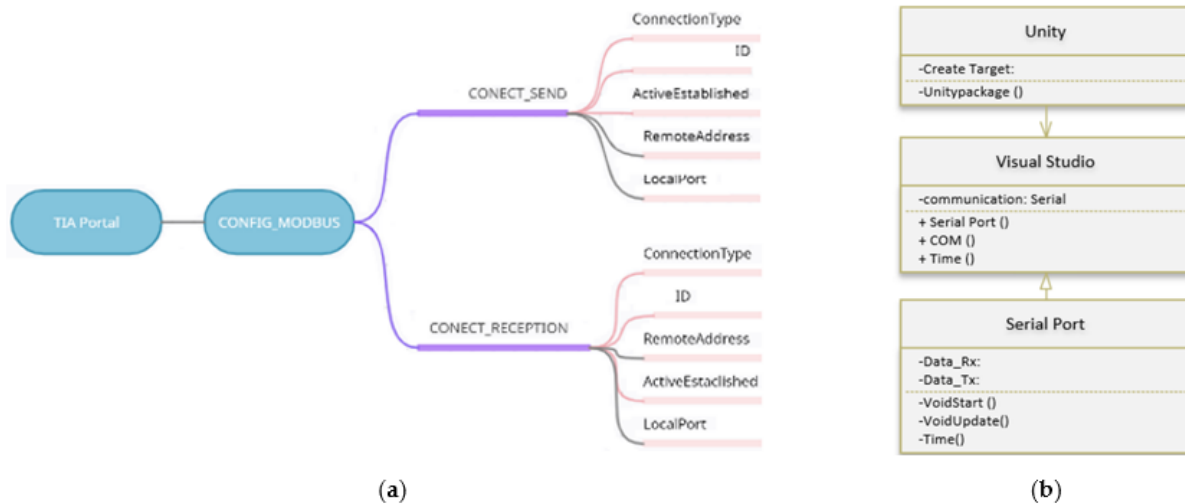


Figura 3.4 (a) Configuración del TIA portal; (b) Unidad de comunicación y el sistema integrado.

### Digital Twin Implementation

The virtual space is the first part of the DT, which incorporates the 3D digital representation of the physical environment. This environment includes the attributes, properties, and operating rules of the process in the physical world. The DT was implemented in the sorting station of the MPS 500, which has industrial elements. Ethernet communication was used for sending and receiving data between the process and the digital environment. The hardware and software elements used are shown in Figure 3.5.

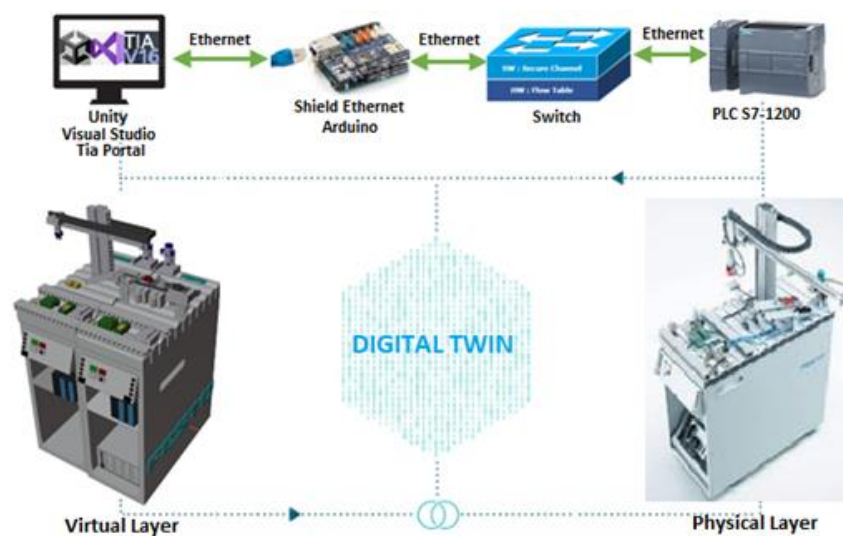


Figura 3.5 Implementación del Digital Twin.

The system has a physical and virtual entity designed in a 3D model. These entities communicate bidirectionally and contain digital information, design parameters, and real-time sensor data. The proposed system must comply with several parameters described in Table 3.2.

Tabla 3.2 Parámetros para el diseño de Digital Twin

<b>Autores</b>	<b>Título</b>
R1. Communication	R1.1 The system provides communication services between the physical and virtual entities. R1.2 The system has bidirectional communication. R1.3 The system has real-time communication
R2. Operation	R2.1 The system receives the command from the operator. R2.2 The system executes the command sent by the operator. R2.3 The system tracks the status of the process. R2.4 The system detects objects and events of interest in the environment.
R3. Information	R3.1 The system displays the status of the process. R3.2 The system displays the relevant sensor data. R3.3 The system displays the simulation of the physical environment. R3.4 The system manages simulation data and analysis data

## Results

As part of the results, a survey was carried out on 20 university professors with knowledge in the area of Industry 4.0 to determine the functionality and operability of the proposed DT. The survey consisted of five questions aimed at obtaining feedback from the research and knowing the point of view of the users regarding the functional, operational, and informative parts, as shown in Table 3.3. For the selection of the people surveyed, their experience in the industrial field, and their professional training in the area of study, later the number of respondents was selected by simple random sampling to obtain their point of view and possible suggestions on the proposed methodology.

Tabla 3.3 Preguntas de funcionamiento y operatividad del Digital Twin.

<b>N°</b>	<b>Question</b>
R1	Is the 3D digital environment created for the process simulation adequate?
R2	Would you like to use the DTs with AR as training before actual practice?

R3	Is the system capable of detecting events and objects of interest in the real environment?
R4	The system is capable of managing and processing the simulation data?
R5	Is there a perception in real time of the changes in the state of the process?

Figure 3.6 shows the results of the survey. A total of 87.5% of the respondents fully agreed with questions R1 and R2, which are informative and evaluate user satisfaction with the WP. Questions R3, R4, and R5 assess the operation and functionality of the proposed system, with 91.6% of acceptance.

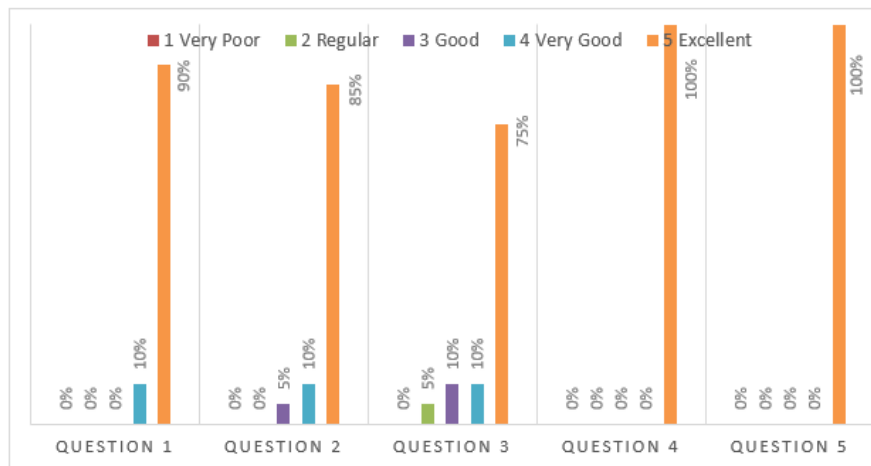


Figura 3.6 Resultados del estudio de operación y operatividad.

Communication tests of the physical and virtual environment were performed in real-time to observe events and data management. The virtual environment and mapping interaction allows executing and triggering actions on the physical equipment simultaneously, as shown in Figure 3.7 (a), (b). All 3D design features (dimensions, surfaces, materials, etc.) must be considered to create the digital model. The 3D model of a piece can be complemented with the product manufacturing information (PMI), according to the ISO 16792 standard [58].



Figura 3.7 (a) Entorno físico y virtual; (b) Entorno virtual con Realidad Aumentada.

The packet delivery time between the physical and virtual entities was analyzed. For this purpose, the WireShark tool was used in the Ethernet network, obtaining an average time of 100 ms. This time varies depending on the number of packets sent by the sensors, as shown in Figure 3. 8.

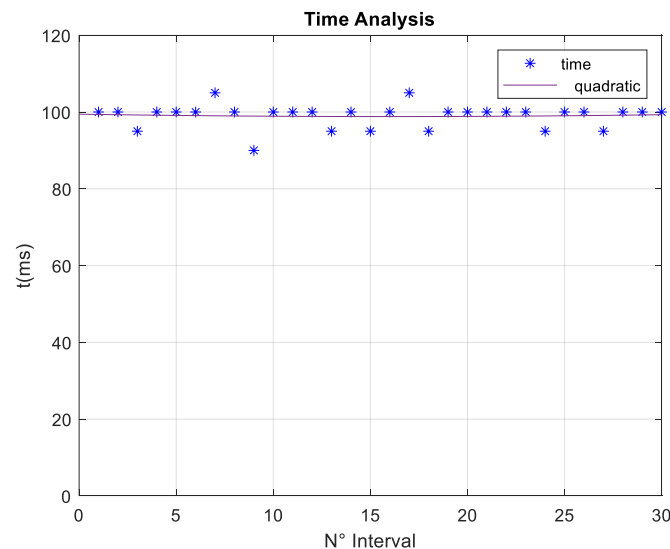


Figura 3.8 Tiempo de comunicación entre el entorno físico y virtual.

### 3.1.5. Discusión “publicación (1)”

Due to their dynamic characteristics, Digital Twins are being valued in academia and industry. However, there is no defined architecture for their implementation. After reviewing different works and studies, we can say that the leading enabling technologies for developing DT are the Industrial Internet of Things, artificial intelligence, big data, cyber-physical systems, augmented reality, and virtual

reality, which have had rapid development. These technologies are the right tools to support and improve manufacturing processes, offering an excellent opportunity to transform current manufacturing and implement smart manufacturing. These technologies also increase the ability of operators to understand, explore, and control production elements (See Figure 3.9).



Figura 3.9 Oportunidades y desafíos del Digital Twin.

The results show that the proposed methodology for the implementation of the DT allows bidirectional communication between the physical and virtual environment and can also be visualized with the support of AR, thus providing its characteristics to the proposed DT. When using an industrial environment with CPS that has robust devices and elements, communication with the DT cannot be carried out directly through the different communication protocols of each technology. However, thanks to the OPC UA, Ethernet, and M2M protocol, communication was achieved between the different levels of the automation pyramid and the components proposed for the DT. Among the advantages presented, it is shown that robust “PLC” devices that companies have with low-cost embedded systems can work together to take advantage of the advantages that each of these has.

One of the problems that arose in the investigation was the high consumption of computational resources that the META 2 glasses have, due to the high processing and graphics card that it requires for execution. Due to this, there was a small delay in the visualization of the changes and parameters of the DT with AR for the user; however, on the CPS screen it was observed in real time. CPS applications must be enhanced to achieve interconnection between the real world and its digital representation for manufacturing by creating virtual environments that are necessary and strategic to raise the quality and efficiency of several relevant factors in the industry, such as safety, optimization, monitoring, maintenance, installation, and prediction. DTs provide innovative solutions to improve features

and fill gaps through simulation, improving manufacturing processes, and avoiding production problems. Figure 8 shows some of the opportunities and challenges of DTs. This technology has an excellent acceptance in industry and academia, which shows that it is an advance that is here to stay and has proposals at the simulation level that must be implemented to prove its functionality.

Several simulation-level investigations with promising results and architectures that can be tested in an actual implementation were considered to carry out this research. The results of this study were obtained by performance in a real process with a high-performance hardware and software infrastructure to simultaneously run the algorithms and trigger actions in the physical equipment. In addition, when using the META 2 glasses, an immersive environment of augmented reality was obtained, managing to increase the advantages presented by the Digital Twin.

### **3.1.6. Conclusiones “publicación (1)”**

DT is a promising technology that provides bidirectional communication between the real and digital worlds and improves manufacturing processes regarding safety, optimization, monitoring, maintenance, installation, prediction, etc. The leading technologies used to support and extend the capability of DT are the Industrial Internet of Things, artificial intelligence, big data, cyber-physical systems, augmented reality, and virtual reality.

The AR application to control industrial variables was developed with the appropriate versions and SDK for using META 2 glasses, creating an intuitive and easy-to-handle environment. Additionally, the Ethernet protocol established bidirectional communication between the physical and virtual environments for approximately 100 ms. PLC S7-1200 hardware, a switch, and an embedded system were used to communicate the systems for field and control level communication, and the OPC-UA protocol was used. Blender, Unity, Vuforia, and Visual Studio software were used to achieve the interaction with the virtual environment and mapping to perform the timely and dynamic adjustment through M2M communication. In this way, data management and production were improved, incorporating the simulation of the process and physical control in real time to execute and trigger actions in the physical equipment simultaneously.

The survey was carried out on university professors with knowledge in the area of Industry 4.0, where the results showed that 87.5% of those surveyed fully agreed with questions R1 and R2 regarding the digital environment used and the

feasibility of using the DT as a training system. Meanwhile, in questions R3, R4, and R5, they evaluate the functioning and operation of the DT so that the industrial process complies with the established characteristics, and 91.6% acceptance was obtained.

### **3.1.7. Referencias “publicación (1)”**

Las referencias de la publicación 1 se puede observar en el anexo 1 donde se añade la publicación completa.

## **3.2. Immersive Digital Twin under ISO 23247 Applied to Flexible Manufacturing Processes.**

La publicación (2) contribuye al cumplimiento de los objetivos de la investigación. Para el desarrollo de la arquitectura propuesta se basa en el estándar ISO 23247 que fue creado para normar el diseño de Digital Twin en la industria, la propuesta presenta la implementación de un DT en dispositivos de bajo costo apoyado en AR y tecnología háptica para el control y monitoreo de procesos industriales.

*Abstract.* Digital twin (DT) technology provides a path for implementing cyber–physical systems (CPS) and developing smart manufacturing because they are essential tools for monitoring and controlling manufacturing processes. It is considered a vital technology in smart manufacturing and is being widely researched in academia and industry. Furthermore, the combination of DTs and immersive environments has shown great potential for integrating novel capabilities into the new generation of CPS. This research presents an architecture for implementing immersive Digital Twins under ISO 23247 in flexible manufacturing processes. The proposed system is based on the integration of DT technologies in conjunction with augmented reality (AR) and gesture tracking, and validation was performed in the sorting station of the MPS 500 to increase the interaction and flexibility between physical and virtual environments in real time, thus enhancing the capabilities of the DT. The methodology used for the design and implementation of the DT includes (1) general principles and requirements; (2) models with functional views based on domains and entities; (3) attributes of the observable manufacturing elements; and (4) protocols for the exchange of information between entities. The results show that the integration of these technologies improves the monitoring, control, and simulation capabilities of processes using 3D resources and immersive environments, achieving a higher

level of interactivity. In addition, error detection tests were carried out, where a reduction of time was observed in the resolution of errors that may be caused by internal or external disturbances of the process, thus avoiding production delays

### **3.2.1. Introducción “publicación (2)”**

Digital transformation has been driven by various technologies, such as cyber–physical systems, big data, Internet of Things (IoT), Industrial Internet of Things (IIoT), mobile devices, cloud computing, robotics, artificial intelligence (AI), blockchain, mixed reality, DTs, and collaborative and social tools [1]. Smart manufacturing, also known as Industry 4.0, aims to enhance productivity, quality, and efficiency in production by integrating technologies to automate and optimize various tasks, including supply chain management, quality control, and production planning [2]. These emerging digital technologies, such as industrial interconnection and DTs, have changed methods, production models, industrial organizations, and international patterns, and the digital economy is transforming and enhancing the manufacturing industry [3].

Industry 4.0 has revolutionized manufacturing systems through several technologies that have proven to be highly valuable. The main ones are virtualization through CPS, IoT, and DTs; these technologies combine data collection and analysis to facilitate interaction between physical and virtual spaces with bidirectional communication [4,5], enabling the connection and visualization of all elements. Moreover, they provide information concisely and seamlessly to facilitate intelligent decision-making, thus accelerating industrial modernization. A cyber–physical system combines computational, networking, and physical elements to control and monitor the physical environment in real time [6]. Digital manufacturing and CPS have contributed to enhancing DTs through real-time production and operation data [7]. The main reasons for using these technologies in the industry are analysis, diagnosis, and predictions about future performances in the processes [8].

DTs are 2D or 3D computer-based digital replicas that simulate and reflect a physical entity’s life to extract data from the real world and process information in digital models to monitor, diagnose, optimize, predict, and support real-time decision-making [9,10]. They are considered a fundamental technology for smart manufacturing, so they have been extensively researched in academic and industrial domains. Several authors have proposed different methodologies and

architectures for their implementation in the industry. However, only some studies show a standardized approach for developing DTs in industrial applications [11]. One of the most significant challenges is to create a well-defined 3D digital structure to connect them with the actual model. This indicates that some barriers in the industry must be overcome so that all the benefits of DTs can be fully leveraged in an industrial context [12].

Another challenge is to create reliable models with acceptable computational costs, low latency, and analysis using artificial intelligence techniques. However, the development has gained strength in recent years with the advancement of Information and Communication Technologies (ICTs), as sensors and technological infrastructure have become more cost-effective and reliable [13]. Several studies have shown that the implementation of DTs in industries provides the opportunity for seamless information transfer, process replication, diagnosis, increased productivity, the development of intelligent systems, and predictive analysis [14]. As the integration between the real and the cyber world progresses, virtual interfaces for visualization between the operator and the virtual environment must evolve in parallel. For this reason, immersion technologies, such as virtual and augmented reality, allow for the immersive and interactive visualization of DTs [4]. The integration between DTs and AR in the industry provides valuable information about the design and function of a product, in addition to optimizing processes and reducing operator training costs [15].

The combination of AR and DTs has sparked growing research interest because it has demonstrated its potential to integrate operators into the new generation of the Human Cyber Physical System (HCPS) [16]. It is a technology that combines the real and virtual worlds, interacting in real time to create an immersive and interactive experience in two or three dimensions. This technique allows digital content to be overlaid to the real world, typically through optical displays or videos that can be viewed through glasses or mobile devices such as smartphones and tablets [9].

For the industry, AR promises to change and improve the way operators interact with production processes, enabling access to information through virtual overlays. It can be applied in assembly, maintenance, and monitoring tasks, providing greater flexibility for data access. Industrial augmented reality (IAR) is a crucial technology for Industry 4.0, as it can enhance workers' performance, reduce risks, and improve production processes [17]. IAR refers to integrating digital information with the real world using computer-generated sensory information

such as video, sound, graphics, or GPS data. Combining these technologies promises to change how an operator interacts with production processes, enabling access and interaction with real-time information [18,19].

This proposal aims to implement an architecture for an immersive DT under the ISO 23247 standard in an industrial environment, highlighting the capabilities of including immersive technologies for monitoring, controlling, and simulating industrial processes in real time. It is hypothesized that the implementation of this technology will lead to the integration of immersive technologies in a DT, enhancing the interaction between physical and virtual entities using AR and Senso Glove technologies and improving operational efficiency and decision-making in industrial environments.

The contributions of this research are

The implementation of a DT under ISO 23247 supported in augmented reality for monitoring, simulating, and controlling an industrial process using low-cost devices with cloud communication under the Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol.

The development of an immersive reality method to manipulate variables using Senso Glove and an augmented reality interface for interactive visualization on the immersive DT platform.

The analysis of immersive DT results through experimental tests, bidirectional communication, error generation, and measurement of response times.

### **3.2.2. Trabajos previos “publicación (2)”**

To carry out the state-of-the-art analysis, a review of the works undertaken in the industry in the last 5 years was carried out. This research reviews renowned databases (Elsevier, Science Direct, Web of Science, IEEEXplore, Springer, and Scopus) to find studies on DTs and mixed reality in the industrial field. The purpose was to explore various applications and architectures by analyzing proposals made by other authors and the enabling technologies for their development. The identification of articles began with extensive queries of academic literature databases for a series of thematically essential keywords. For example, the following keywords were used, typically in sets of two and groups of three or more: [Digital Twin, Augmented Reality], [Digital Twin, ISO 23247],

[Digital Twin, Senso Glove], [Digital Twin, Immersive Environments], and [Digital Twin, Industry 4.0, Augmented Reality]. Furthermore, for the selection of the articles, it was sought that the methodologies proposed by the authors had been implemented at an industrial level and not only simulated, to guarantee the possible application.

Works were sought that used robust industrial protocols and protocols that could be implemented in low-cost embedded systems. Regarding the programming language, the search was carried out in a general way because, in research, different languages can be used according to the level found according to the automation pyramid. Finally, DT papers implemented with mixed realities (virtual reality and augmented reality) were searched to learn about the characteristics and advantages they provide when combining these technologies. After the review of articles that met the characteristics, 15 articles were obtained, only 1 of which was based on the ISO 23247 standard, which shows that the proposals presented on the topic are quite open.

One of the areas where DTs are used is in maintenance, where several investigations have been carried out. In [20,21,22], they present a DT to perform the predictive maintenance of a wind turbine and reliability in floating offshore wind turbines (FOWTs). The architecture presents a distributed DT with IIoT, machine learning (ML), MQTT, and fog computing to offer the better utilization and management of assets through real-time condition monitoring, predictive analysis, and the health management of selected wind turbine components in a wind farm. The architecture presents three layers: (1) the cloud layer, where there is deep learning and cloud computing; (2) the fog layer, where there are fog nodes for the DT interfaces, APIs, and SDK; and (3) the IoT device layer, where turbine sensors and actuators are located.

The results show that the DT offers a good solution; however, it is an emerging technology that could be improved with better standards, architectural frameworks, and implementation methodologies. In turn, this shows that the integration of technology in FOWTs provides valuable information in the DT for reliability and performance optimization. Furthermore, it shows the potential of DTs as a valuable tool for renewable energy, boosting efficiency and sustainability in floating offshore wind installations. In [23,24], they propose a DT-based method for fault diagnosis and prediction, aiming to compensate for the shortcomings of existing methods: the single fault type, low similarity, and poor visual effect of state monitoring. For this, a complete model is built that represents all the

elements, processes, and businesses of the physical workshop using a testing platform to acquire real and simulated signals under various operating conditions. For prediction, they use the “digital twin network + short-term memory (LSTM)” algorithm. The results showed that the proposed method has a high rate of accuracy in the prediction for the production line because integrating the function of feedback allows for an accurate perception of the current state and future changes.

Research with applications that are or can be applied in the industrial area was also reviewed, such as [25], which proposes the integration of knowledge graphs (KGs) and DTs to develop highly autonomous and flexible DTs that use semantic knowledge stored in the KG to support functionalities. The presented proposal was implemented in a real laser glass-bending process and comprises smaller virtual objects (VOs) that interact as a single-step abstraction of the process, providing functionalities that simulate the corresponding real-world process. By executing appropriate queries to the KG, the DT can orchestrate the functioning of the VOs and their physical counterparts and configure their parameters accordingly, thereby increasing their self-awareness. The results showed a highly flexible system and dynamic configuration that allows for the implementation of several algorithms and the storing of information about the materials and industrial business processes in which they participate.

In [26,27], they use a DT for the control and optimization of a multivariable thermoelectric system and a multivariable valve. The proposed methodology consists of the following stages: system definition, parameter identification, data-driven multiphysics simulation, behavior matching, and implementation. The system is composed of industrial elements and embedded systems for control and data collection, and later, statistical techniques are used to estimate parameters. The results obtained indicated that the use of DTs increases the accuracy of the system representation, allows for monitoring the state of the process, and provides information that can be used for decision-making at different levels of the process. In [28,29], they present the design of a high-fidelity DT for an articulated robot and an architecture to reinforce the sustainability of logistics processes in Industry 4.0; they rely on Matlab 2023 software, the Simscape Multibody tool, and industrial devices. A PLC, Open Platform Communications United Architecture (OPC UA) communication, and data transmission through KEPServerEX V6 software were used for further processing. The objective was to present a comprehensive DT methodology that allows for design, monitoring, and

optimization. The results at the simulation level showed that this model can be used reliably in simulations where there is high fidelity in the design, control, and data generation for approaches based on learning and the optimization of energy consumption.

In [30], they propose a DT architecture for an automotive infotainment system. The proposal shows the development of a solution to manage hardware processing, monitoring in the virtual environment, and system control. The design of the DT was based on the ISO 23247 standard, and an individual interface was implemented for each component with radiofrequency (RF) technology and a Raspberry Pi 4 card with Python programming language. The results showed that the DT concept allows for the implementation of monitoring, control, and self-diagnosis functions of a system.

Within the development of DTs, there is research on the use of technologies with AR and VR to expand the capabilities of DTs, as shown below. In [31,32], a DT is presented for the control and monitoring of industrial processes, supported by AR and VR. Robust devices (field level and control) and low-cost embedded systems were used to create and communicate the virtual environment (monitoring and control). For this, the OPC UA, MQTT, Ethernet, Profinet, Modbus, machine-to-machine (M2M), and node RED protocols were used for communication. The results demonstrate bidirectional communication between the physical and virtual environments, allowing for visualization through AR or VR and facilitating interaction with the virtual environment. This allows for timely and dynamic adjustments to be made in real time to improve the efficiency of industrial processes.

In [33], they propose a real-time building information modeling (BIM) data compatibility verification method based on AR and DTs. The verification module was designed based on prototype tests and functional improvement in the engine room and on the FAB site, which consisted of the application of anchors based on markers and the optimization of the FAB site. The AR adjustment and fixation module were developed, and visual SLAM was based on Unity along with AR Foundation using SLAM, 2D tracking, and local anchoring API in ARCore. The results showed that the proposal allows for the precise adjustment of the AR model and the real object through AR tracking and anchoring technology considering the characteristics of the FAB sites, maintaining compatibility even when the camera and the marker were moved. In [4], they present the experimental implementation of the integration of a DT and AR, to develop a human-machine interface for the

remote monitoring of industrial cyber–physical systems. For the process, Factory I/O version 2.9 simulation software was used, the TIA platform was selected for PLC programming, and for the 3D design, Unity version 2018.4.36f1 and Blender V3.2 software were used to model and animate the virtual models of the industrial process. Finally, the results were analyzed, and it was observed that the system offers more flexibility to access the information generated through holographic projections on any surface using a QR code, allowing for new opportunities to visualize the monitoring states.

The reviewed literature shows several trends. It is observed that most of the works presented by other authors do not follow a standard for DT architectures; however, as it is a developing technology, companies and universities continue to present proposals without them being based on technology or fixed protocols. It is observed that the most used protocols for communication are OPC UA, TCP/IP, AMQP, MODBUS, and MQTT for their lightweight and easy setup; they also allow for bidirectional communication and can be used at different levels of the automation pyramid, allowing for total integration in the processes. On the other hand, several trends and enabling technologies are evident for the development of this technology and the interoperability that can be achieved between different platforms to design DTs.

### **3.2.3. Materiales y Métodos “publicación (2)”**

In this work, a DT is carried out under the ISO 23247 standard for the control and monitoring of processes using AR and gesture recognition in an industrial environment.

The ISO 23247 standard is a standard to support the creation of DTs; however, it depends on the standards and technologies available to model the manufacturing elements—that is, the standard does not prescribe specific data formats or communication protocols [34]. It is composed of a four-layer framework, as shown in Figure 3.10, which describes the observable manufacturing elements, a digital entity that allows for modeling and updating the DT, a device communication entity, and user entities.

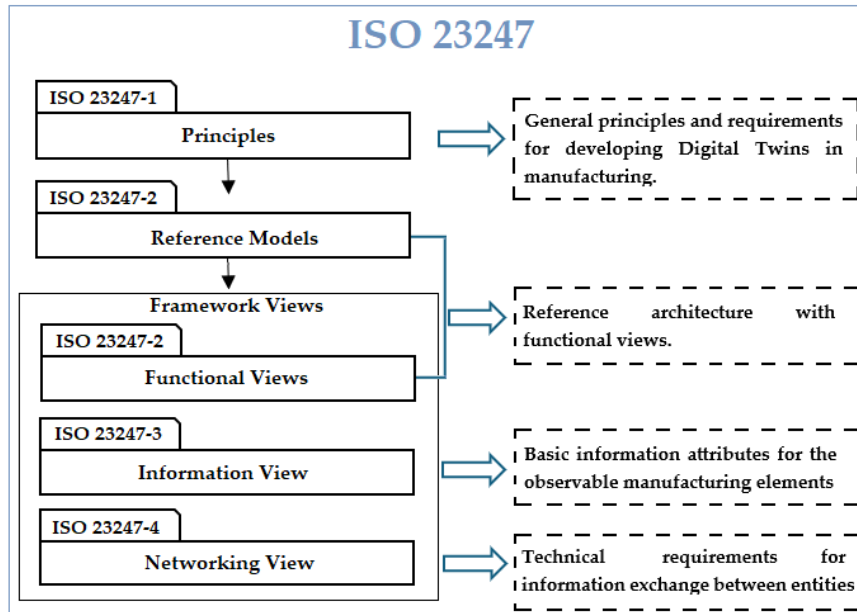


Figura 3.10 El marco del Digital Twin para la fabricación bajo ISO 23247 [34].

From the review of the state-of-the-art research presented in the previous section, it is evident that the methodologies proposed for the implementation of DTs are not based on an established standard. However, this provides a background and current basis regarding the use of technologies and protocols for bidirectional communication in industrial environments and modeling and simulation tools for immersive environments. It can be highlighted that there is no closed concept or standard for the development of DTs; this is because it is a tool that is under development, and it is a central point of research in academia and industry due to the advantages it presents.

Figure 3.11 shows the general diagram of the methodology followed for the implementation of the immersive DT based on the ISO 23247 standard, which shows the steps followed. This includes the physical process, communication protocols, ISO standards, design, general characteristics at each stage, and the analysis of results. It should be considered that the standard used does not restrict the use of technologies and protocols used; however, it has clear parameters that the physical and virtual entities must comply with and have, as well as the communication between them at the industrial level.

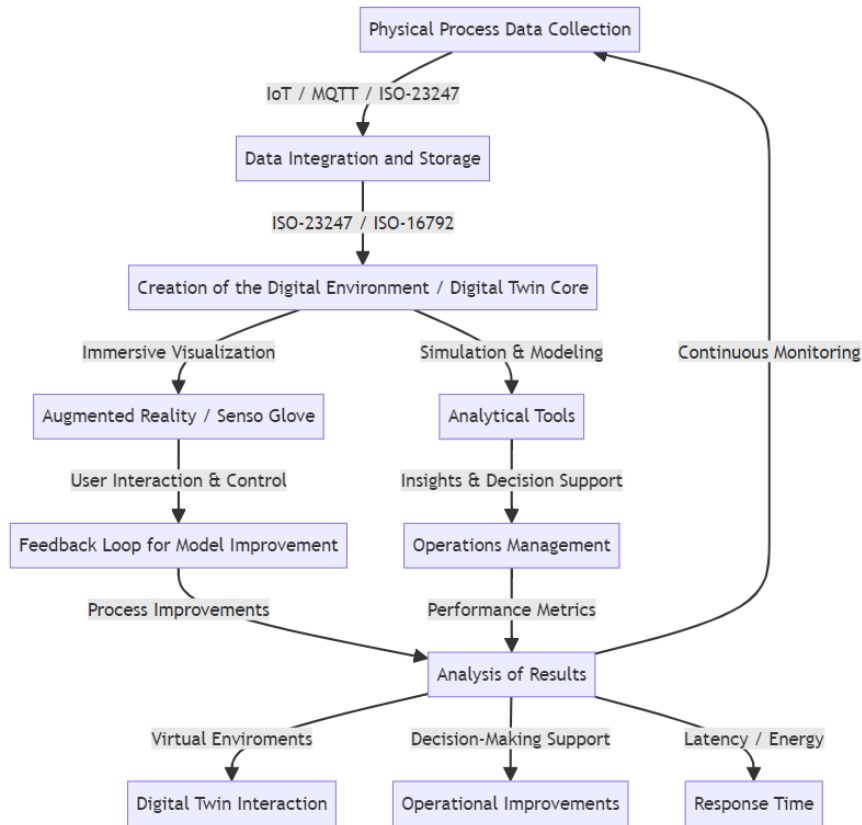


Figura 3.11 Esquema general de la metodología propuesta.

The design of the architecture for the implementation of the DT was based on the ISO 23247 standard, which establishes the main parameters for the architectures of a DT. Figure 3.12 shows the parameters that were considered in the physical, virtual, and communication entities for this proposal. As a standard that does not limit the use of devices and protocols, the following proposal is made. The creation of the virtual environment with the help of Blender V 3.3 software based on the ISO 16792 standard, which complements the existing standards and focuses on 2D and 3D modeling in digital format, the communication will be performed using the MQTT protocol, and the data will be sent to the cloud for subsequent integration and interaction with AR and the Senso Glove between the physical and virtual entities. Finally, the proposal will be implemented in the MPS 500 station through an embedded system for the subsequent analysis of results through experimentation and operation tests under different process configurations.

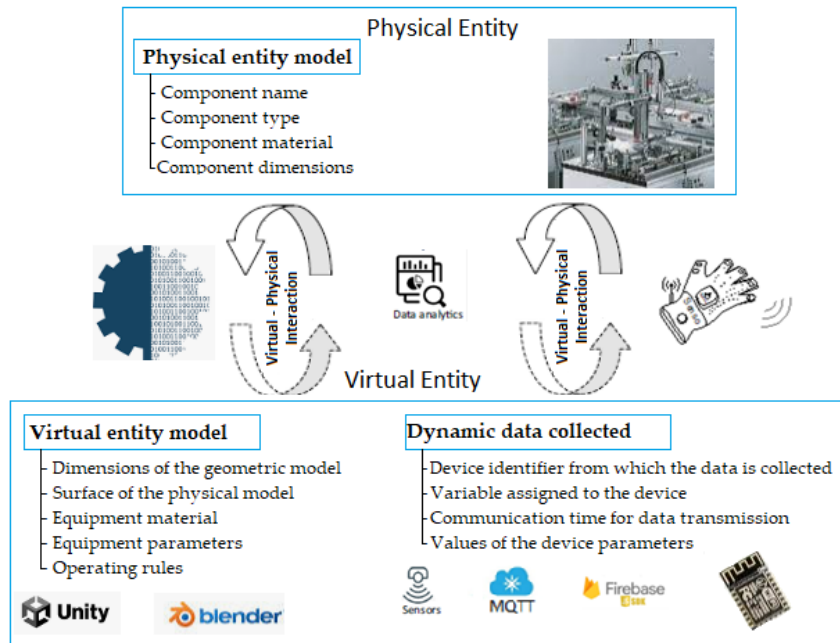


Figura 3.12 Arquitectura de desarrollo de sistemas Digital Twin inmersivos.

The physical model is the foundation of the DT. This industrial process incorporates sensors, actuators, and a controller (embedded systems) to gather and transmit all the information that is later stored and processed in the cloud through IoT. This section presents the components that were considered for each stage. To design the model of the physical entity, the following component attributes must be considered: Component name, Component type, Component material, and Component dimensions, so the information attributed to the necessary physical components for creating the digital environment can be observed.

The digital model is developed using Blender software. The design considers a scale with precise measurements and dimensions for each component, and finally, it is exported with the .fbx extension. This includes the details of the physical entity, which are later used for creating animations and AR executions through the Unity game engine. The design includes external disturbance identification, monitoring, control, and process simulation models. All the 3D design features can be complemented with product manufacturing information (PMI) according to the ISO 16792 standard [35]. Several components are considered for the design of the virtual model, such as the dimensions of the geometric model, the surface of the physical model, equipment material, equipment parameters, and operating rules.

The digital system requires a constant flow of information. This information is obtained through data input during the process simulation and automatically collected from the physical entity through sensors. The data are sent to and stored in the cloud, providing information about the process and the management of physical and virtual models, allowing for the analysis and control of the process based on these data. The interaction occurs through bidirectional communication interfaces using the MQTT protocol.

For the AR interface, the virtual environment is exported to the Unity platform to be subsequently visualized, and control parameters are established using the Meta 2 AR Glasses device. Data transmission can be wired or wireless, depending on the type and importance of the data. These dynamic data collected from the physical model are used to modify the parameters of the virtual process model and are as follows: device identifier from which the data are collected, variable assigned to the device, communication time for data transmission, and values of the device parameters.

Hand gesture applications have increased as technology advances, allowing for more natural ways to interact with computers. The data gloves used in this research are the Senso Glove: DK2 from Senso Device Inc1 [36]. The Senso Glove is a tool that can interpret hand and finger movements through sensors of inertial measurement units (IMUs) and wireless communication. It features eight inertial measurement units and two magnetometers in the wrist and palm, allowing it to accurately detect hand and finger movements without needing a camera. The eight sensors precisely measure the orientation of each part of the hand through a combination of accelerometers and gyroscopes [37].

The Senso Glove is used as a control tool for the system, as hand movements become the input for the system. Thanks to wireless communication, users can move their hands freely; additionally, the glove provides tactile feedback through vibration, enhancing user interaction [38]. It can read hand and finger movements and has been used in various applications. Therefore, in this research, it will be used for the immersive control of the process to analyze the interaction that this technology can provide in conjunction with the DT.

### **3.2.4. Implementación “publicación (2)”**

The architecture used for the design and implementation of the DT includes (1) a physical model: a MPS-500 classification station; (2) a digital model supported by

AR; (3) an immersive environment with Senso Glove; and (4) IoT. The proposed methodology is for a DT for monitoring and controlling an industrial process, where the use of AR is proposed to establish an environment that allows for adding additional information to the physical environment, thus improving human-machine interaction and allowing for simulations of the process in real time based on the data obtained.

The Meta 2 glasses are used due to the advantages they have, and the sensors are attached to this device for interaction. In addition, control using gestures is proposed to increase the interaction of the physical and virtual environment where Senso Gloves are used due to the versatility and number of movements that can be had for better interaction with the processes. Finally, an embedded system is used to send the process data to the cloud and subsequently to each of the devices. In addition, the MQTT communication protocol is used, which allows for bidirectional communication. The integration of these technologies aims to enhance an operator's monitoring and control capabilities by using 3D resources in a graphical interface and to increase interactivity through a controller that detects the movements of the user's hand and fingers.

The MPS-500 classification station from the production plant was used as the physical entity to implement the DT supported by AR and immersive environments. This station was selected because it has industrial sensors and actuators, and it also allows various types of processes to be carried out with different conditions, which helps to verify the operation of the proposed DT. For the research, control (AR glasses and gloves) and monitoring (AR glasses 3D environment) will be carried out, and the parameters that can be configured are a start, a Cartesian arm movement, a conveyor belt, etc. The 3D digital design was developed using Blender software, and the process data were sent to the cloud via the Photon card using the MQTT protocol. These data were stored and processed to later interact with Meta glasses and the Senso Glove.

The Festo MPS-500 plant sorting station consists of the three stages described below.

Stage 1—Main conveyor belt where the final products arrive to be classified.

Stage 2—The manipulation station is equipped with a flexible two-axis manipulator (“x”, “y”), which has sensors (optical, magnetic proximity, reflective) and actuators (parallel grippers, flat cylinder, linear actuator horizontal) that are used for intermediate transportation from Stage 1 to the classification stage.

Stage 3—Final classification, which consists of three ramps to classify the pieces by color or material and a ramp to discard. In addition, it has sensors (retroreflection, direct reflection, inductive, and presence) and actuators (short stroke cylinder, compact cylinder, DC motor, and diverters).

For implementation, the main steps for the design and communication of physical and digital entities in conjunction with immersive environments are detailed below.

### Senso Glove Communication

The communication between the Senso Gloves and the computer is established through a radiofrequency (RF) antenna that allows for configuring the working frequency. For this application, a frequency of 433 MHz was used, capturing the values from all the built-in IMU sensors in the gloves to obtain the hand position, palm space, and movement of all the joints. The software responsible for reading and digitizing the signal from the glove is implemented using Senso DK3 version 1.17. To ensure proper functioning, it is necessary to configure and calibrate the gloves, as shown in the UML diagram in Figure 3.13.

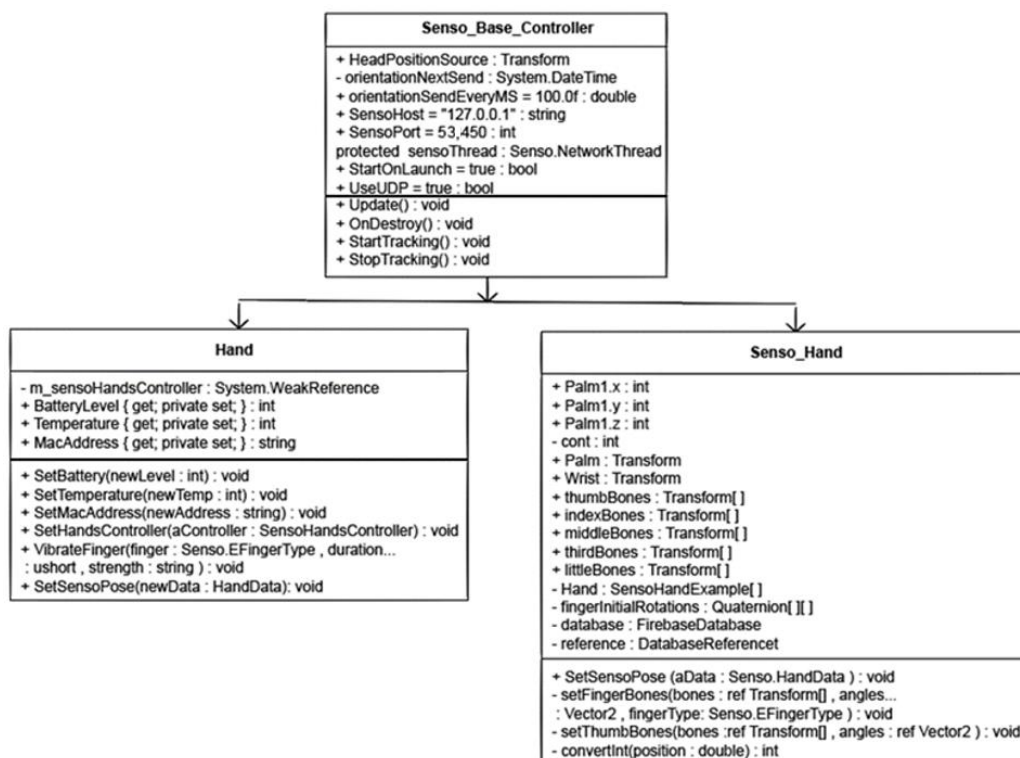


Figura 3.13 Diagrama UML de la configuración del Senso Glove.

The `Senso_Base_Controller` establishes wireless communication to obtain sensor data. The hand allows for access and interaction with the data received from the glove. The `Senso_Hand` provides knowledge of the current state of each sensor—in this case, the respective movement of the coordinate axes (X, Y, Z), which is processed to guarantee the movement of the digital hand. Additionally, communication with the Firebase cloud is carried out for sending and receiving data, enabling interaction with the industrial process.

The calibration of `Senso Glove` must be carried out accurately and considering the physical space that is going to be worked to correctly manipulate the physical environment based on the movements generated, and these can be replicated in the virtual environment in real time. To calibrate the glove, the “`SensoHandSDK-unitypackage`” SDK must be imported. These libraries are selected according to the version of Unity. In this study, version “2021.3.19f1” was used. These libraries allow for obtaining the scene in Unity where the work environment is later created. In this process, the physical hand space is modified and adjusted in a virtual representation. To achieve this, it is necessary to modify the Quaternion commands typically used to adjust rotations and movement in the working scene, allowing for a smooth interpolation, avoiding gimbal lock, and primarily relying on complex numbers to represent Euler angles.

The configuration and calibration are carried out using `Senso DK3 easy configurator`, version 1.17. The package must be imported into Unity to incorporate and calibrate the DT. It is essential to consider the encapsulation of each element, so first, it is completely unpacked. Then, each link is assigned to another to generate smooth movement in its physical twin. Subsequently, the DT is calibrated using the Quaternion command based on Euler angles. The analog readings of the variables obtained from the particle cloud, which are based on industrial sensors and previously conditioned in the control board, are used as parameters. Hand gestures are detected in the created digital environment using the `Senso Glove` to manipulate process parameters.

The objective is to provide an interactive environment for users and enhance their experience. An analysis of the positions is performed to configure the working environment within the area created by Unity, aiming to work in conjunction with AR. It is essential to consider the rotation of all axes, which are the rotation around the front-to-back axis, known as ROLL; the rotation around the side-to-side axis, called PITCH; and the rotation around the vertical axis, known as YAW.

Calibration of the Senso Glove is performed in the virtual environment created with the help of Senso SDK, as shown in Figure 3.14.

	PITCH	ROLL	YAW
Initial Position	Pitch: 0.030586 Yaw: -0.040361 Roll: 0.007575	Pitch: 0.030586 Yaw: -0.040361 Roll: 0.007575	Pitch: 0.030586 Yaw: -0.040361 Roll: 0.007575
Min	Pitch: 0.402727 Yaw: -0.141328 Roll: 0.014389	Pitch: -0.061199 Yaw: -0.108349 Roll: -0.691625	Pitch: -0.031848 Yaw: -0.475897 Roll: -0.097341
Max	Pitch: -0.426856 Yaw: -0.052061 Roll: -0.064186	Pitch: -0.273591 Yaw: 0.057322 Roll: 0.472121	Pitch: -0.170962 Yaw: 0.599072 Roll: -0.069917

Figura 3.14 Calibración de la rotación alrededor de los ejes ROLL, PITCH y YAW.

### Integration of the Met a2 SDK into Unity

The ability to merge multiple environments in the same software is one of the advantages of Unity. To achieve this, the Meta 2 SDK incorporates the digital visualization of the plant process. It also includes multiple scripts to enable the rotation, expansion, placement, and positioning of 3D elements within the operator's field of view. The UML diagram in Figure 3.15 shows the configuration of different environments, movements, and button controls for the Meta glasses.

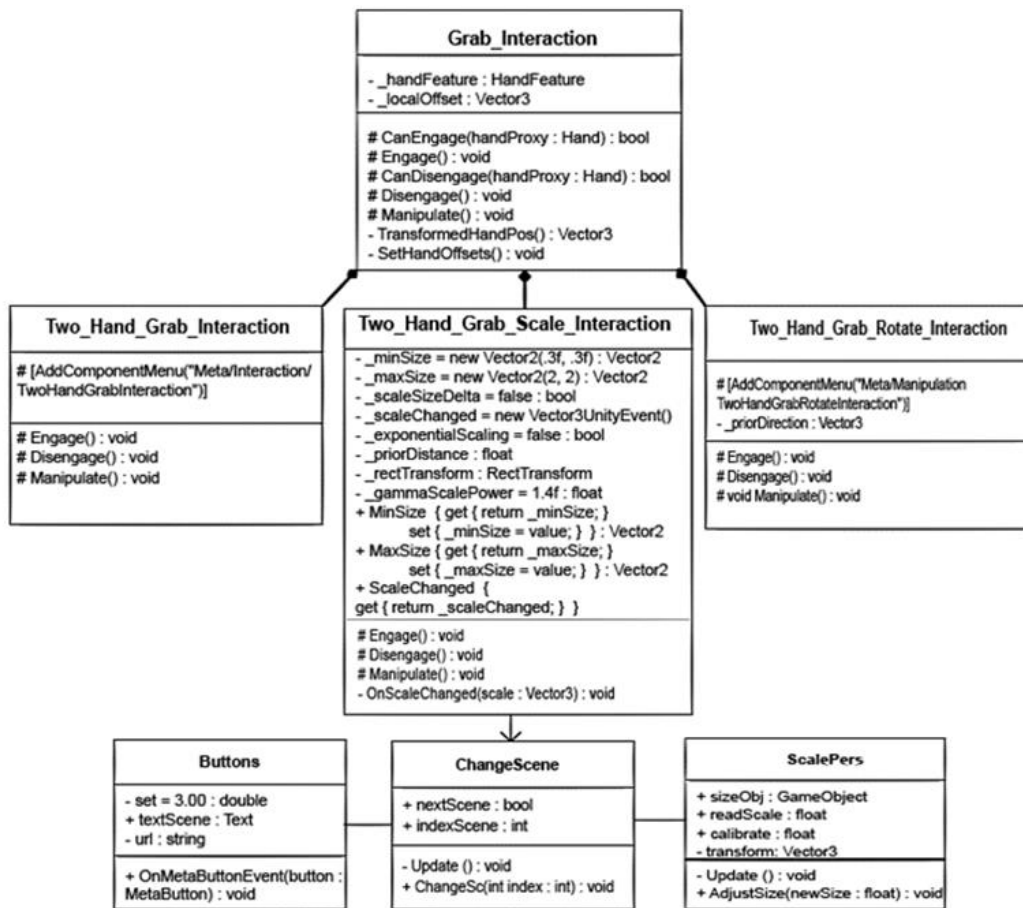


Figura 3.15 Diagrama UML de la configuración para los entornos de gafas Meta 2.

### Communication with the Particle Cloud

The communication is carried out using the particle photon development board, which has the necessary electronics and conditioning to handle industrial sensors and actuators. Additionally, it offers the advantage of using the particle cloud service. To achieve communication, a JSON format is used to send and receive information. Each photon board has a unique ID used for identification, and a label is added to reference the variable to be manipulated. To close the JSON web communication link, a personal access token provided by the created account is used. Figure 3.16 shows the board's configuration for sending and receiving data from the process to the cloud. This is achieved through M2M communication to interact with resources in the physical and virtual environments.

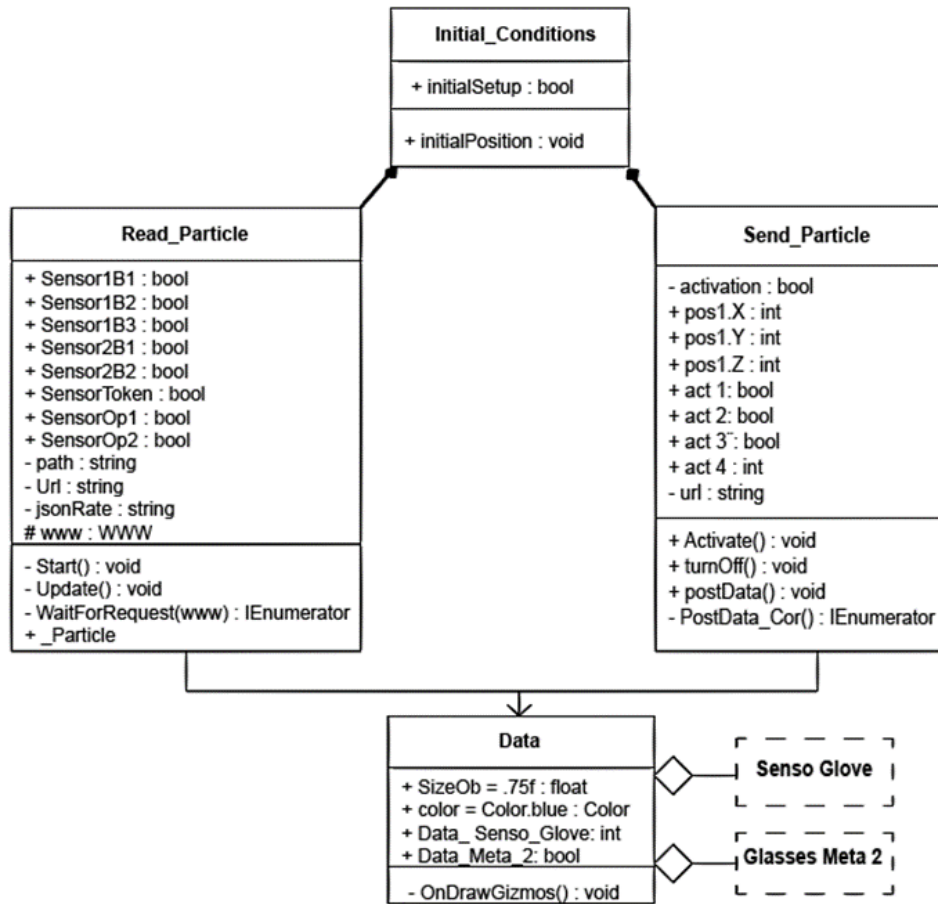


Figura 3.16 Configuración de la tarjeta “Particle Photon”

### PC Features

For the implementation, a high-end laptop was used to execute the programs and digital environment. Subsequently, the analysis of the consumption of computational resources was carried out, because during the DT tests with immersive environments, there was a high consumption of resources as well as problems with the PC when running the Meta 2 AR glasses. An MSI laptop was used in this research, the characteristics of which are shown in Table 3.4.

Tabla 3.4 Características de la computadora

Nº	Features
Operating System	Windows 10 Pro 64-bit
System model	WS76 11UM
BIOS	E17M1IWS.10D
Processor	11th Gen Intel(R) Core (TM)I9-11900H @2.50 GHz
Memory	65,534 MB RAM
Graphics Card	NVIDIA RTX A5000 laptop GPU

When running the DT with AR, a high consumption of resources is observed, primarily in processor usage, reaching 62%. Graphics card consumption is also high, reaching 52%. Additionally, the temperature rises to 60 °C at the beginning and continues to increase, causing delays in the visualization of the DT parameters. These values are high despite the capabilities of the PC, which shows that executing the DT with immersive environments requires high processing to produce better performance.

### **3.2.5. Resultados y Discusión “publicación (2)”**

To analyze the operation of the proposal, several analyses were carried out, as detailed below. Several tests were performed to determine the performance of the proposed architecture, focusing on (1) the interaction of the users with the physical and virtual environments of the immersive DT (AR and Senso Glove) to see the operation and interaction in real time; (2) the generation of internal and external errors during the production line, where the DT generates an immediate alert of the error generated and the location of the error; (3) the measurement of the latency in the process; and (4) energy analysis, which was carried out because a high consumption of computational resources and an increase in latency were observed when using immersive environments with the DT, so we sought to analyze if this parameter affects the control of the process through high consumption or a harmonic distortion in the network.

These parameters were considered to evaluate the main conditions established by the standard, and other parameters were also analyzed to determine if the proposed architecture with immersive environments is feasible to implement and does not affect the process, as the ISO-23247 standard is quite flexible in the use of protocols and technologies involved in the architectures. However, it establishes general parameters and requirements for the design of the DT, models with functional views, components and attributes that must be included in the process, and technical requirements for bidirectional communication.

In the first part, the operation of virtual environments is validated, Figure 8 shows the digital environment controlled by the gloves and supported by AR + Senso Glove to create an immersive and user-friendly environment. Figure 3.17a shows the digital environment controlled with the Senso Glove, where the digital hand can configure the parameters and interact with the digital environments, Figure

3.17b shows the DT with AR and Senso Glove and the real-time interaction with the physical environment. The parameters can be configured from the AR environment or the physical process, and the changes and information can be observed immediately in the created environments. In Figure 3.17c, the DT screen shows the warning of a fault in the process, which was created by the operator when removing the part from the Cartesian arm, and it is evident that the DT immediately detects and changes its status and also generates an alert for the fault and its location. Finally, Figure 3.17d shows the DT only with AR; this is because the system can work independently or in conjunction with the Senso Glove, depending on the needs and characteristics of the process and operator configurations.

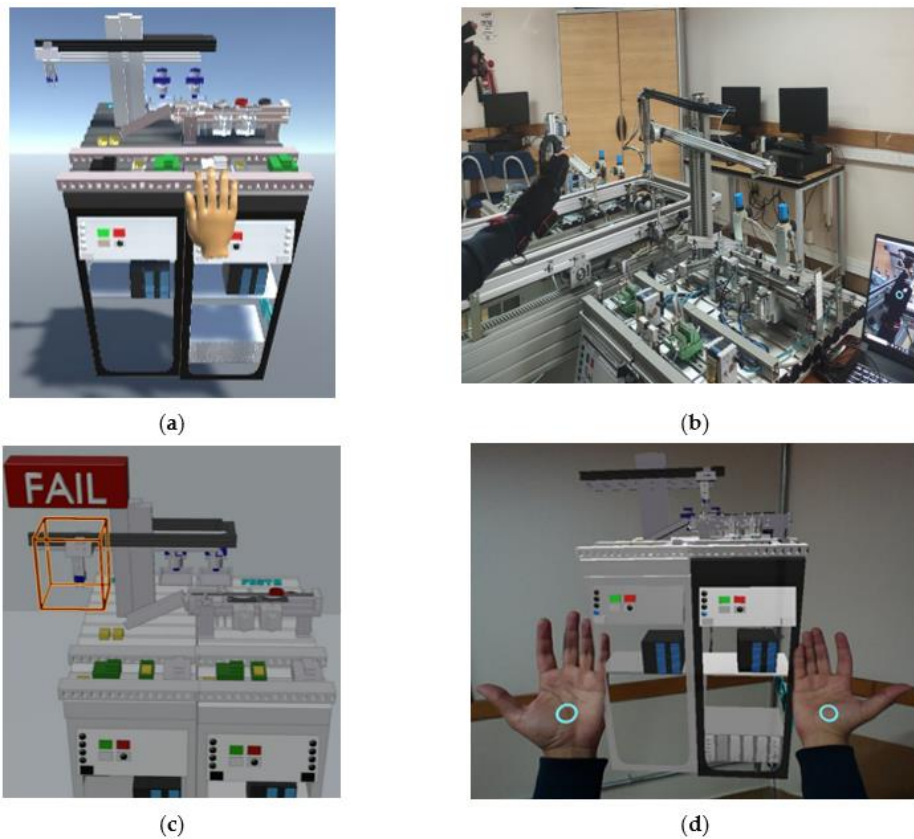


Figura 3.17 (a) Entorno virtual con AR y Senso Glove; (b) Entorno físico y virtual del proceso; (c) Detección de fallas de proceso visualizada en el entorno 3D; (d) Entorno virtual con AR.

To verify the operation of the DT, the manipulation of the Cartesian arm was carried out with the Senso Gloves, where 20 tests were carried out for each position (start, middle, and end), and an average of 95% accuracy was obtained later when using the AR glasses. To calculate the accuracy, the experimental process was carried out several times under the same established conditions; then, an analysis

of the measurement system and activation and deactivation tests were performed to later obtain the deviation of the measurements and the average value (percentage) using statistical analysis. Accuracy was evaluated due to the consistency and repeatability that the physical and virtual environments must have to ensure a good operation of the process and prevent possible failures.

The configuration of the process parameters (number of batches, initial conditions, etc.) was carried out using the buttons on the glasses, and 100% precision was obtained in addition to visualizing and simulating the process in real time. The system allows for bidirectional communication between the entities, where after making the configurations either in the physical space (MPS-500 classification module) or virtual space (glasses or AR), the system begins the manufacturing process of products, and their behavior can be observed in a simulated way. Furthermore, in the digital system, simulations can be carried out to observe the behavior of the system or production that is going to be carried out prior to execution.

One of the tests carried out to verify the operation of the DT consisted of generating controlled errors during the production line. The errors consisted of changing the color of the tokens manually, removing the token from the Cartesian arm, and stopping the distribution actuator. Subsequently, 20 tests were carried out for each of the proposed errors, both for the conventional system and with the immersive DT, under the same characteristics, and the average shown in Figure 3.18 was obtained. It is evident that there is an improvement of 17 s in the average time it takes the user to solve the error and continue with the production line; this is because in the DT, the operator can verify the status of the process with the data he constantly receives, and in addition, the DT generates an alert of where the error occurred and the location, also allowing for the control of some parameters from the AR environment, which helps in improving time. In the conventional process, the operator must visually verify where the error occurred and subsequently provide a solution, which increases production cycle times.

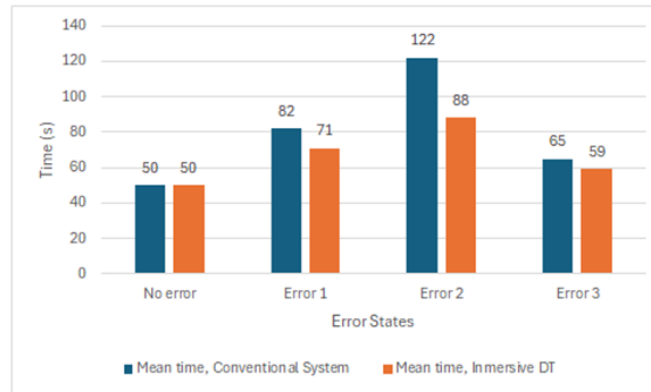


Figura 3.18 Análisis del tiempo de respuesta ante errores provocados por el usuario.

The analysis of the response times of the immersive DT was carried out based on the number of sensors and actuators because it was observed that having a greater number of connected devices resulted in a delay in the execution of the processes; this is due to the amount of data that must be processed and sent to the cloud so that it can later interact with physical and virtual environments. Subsequently, the time analysis was carried out based on the environment of the DT with AR and DT with Senso Glove, respectively, where the activation of several actuators was carried out and the number of actuators was increased to measure the response time. Activation was performed in the virtual environments and was measured based on the activation time in the physical environments. Figure 3.19 shows the response time for each environment, and it is evident that the DT with AR has a longer time compared to the Senso Glove. Therefore, it must be considered that for the implementation of these systems, they have a high consumption of resources, and despite using a high-end computer, there was a constant increase in time depending on the TAGs used.

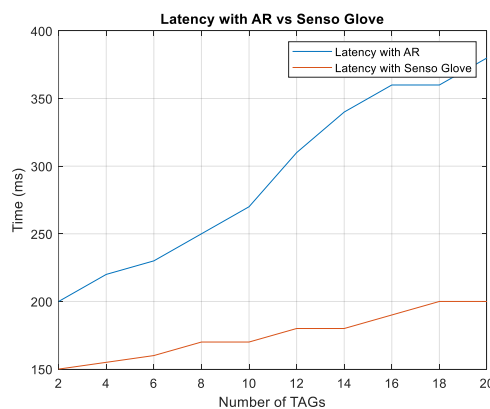


Figura 3.19 Tiempo de respuesta con AR y Senso Glove.

As seen in the previous figure, when executing the immersive environments with the DT, the times increase considerably, which causes delays in communication and lag times. However, these times only increase in immersive environments, while the data are displayed in real-time on the PC that runs the DT, which guarantees good performance. Because immersive environments present a delay in display and a high consumption of resources, the energy analysis was carried out with a Fluke analyzer, where it was carried out in analysis under three conditions, which were (1) system in stop, (2) conventional system, and (3) system with immersive DT. These tests were carried out for continuous time schedules, and the data were recorded with the analyzer. Subsequently, Power Log Classic software V4.6 was used, and the image in Figure 3.20 was obtained. When analyzing the data in Figure 3.19, it is observed that there is no considerable change in voltage in the three phases; however, there is a distortion in the signals obtained, so an analysis of the harmonic distortion was carried out.

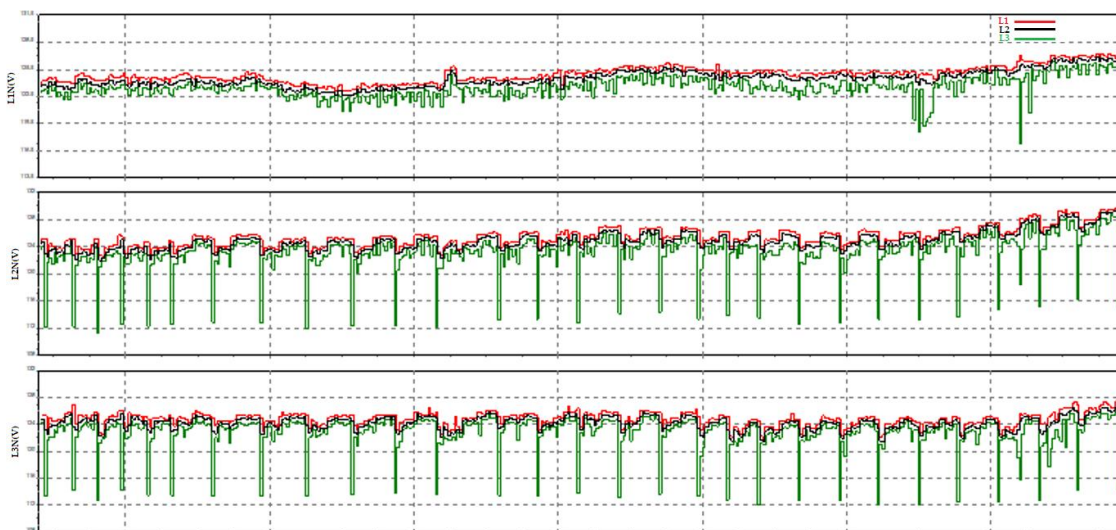


Figura 3.20 Análisis de tensión trifásica.

The analysis of the harmonic distortion was carried out from the data obtained in the previous figure based on the three stages analyzed. This analysis was carried out because if there is harmonic voltage distortion, it can introduce errors to the reference signal and generate an unstable response in the control system, affecting the performance and stability of the system. Figure 3.21 shows the comparison of the harmonics present in the three stages, where it is evident that there is a slight increase when comparing the system operating manually vs. the system operating

automatically with the proposed immersive DT. This is because when carrying out the process operations manually, the devices must start again in each cycle, while in the automatic system, with constant control, there are fewer interruptions in the production cycle. Furthermore, it can be verified that the proposed immersive DT does not directly affect the harmonic distortion, but it does affect the resource consumption of the machine where it is being executed.

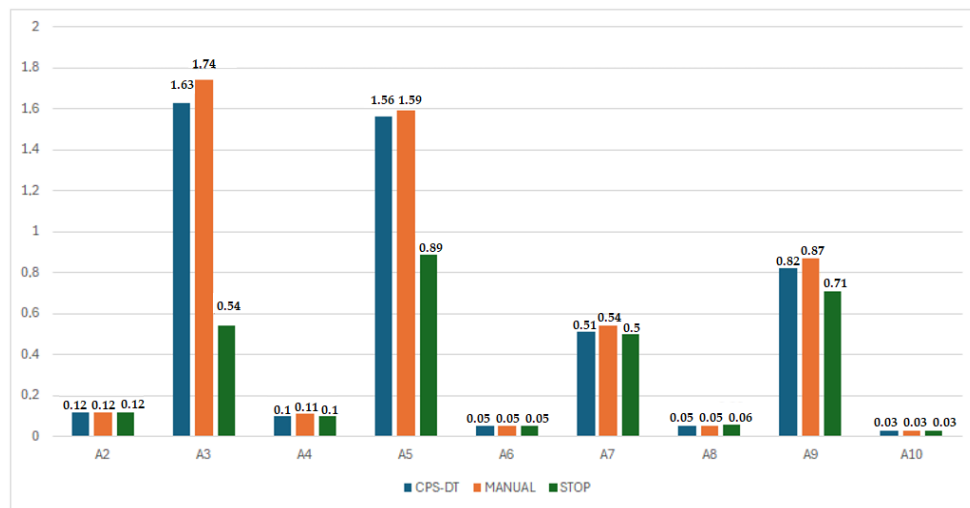


Figura 3.21 Comparación de valores de armónicos de tensión en los sistemas propuestos.

Studies on the use of DTs in industries and educational centers have significantly increased in number. Their advantages have been demonstrated in various research papers; however, the aspect related to their contribution to production cycles, particularly in product improvement or cost reduction, still needs to be clarified. Within the state of the art, it is observed that most of the works presented by other authors do not follow a standard for the design of DT architectures; however, as a developing technology, several industries and universities have focused their attention on it.

For the design of 3D environments, several CAD version 2022 softwares are used: among the main ones are Blender and Solid Work; for communication, the most used protocols are OPC UA, TCP/IP, AMQP, MODBUS, and MQTT; and in the physical environment, the process data are obtained by PLCs or embedded systems [20,29,31,32]. In addition, the integration of several technologies is evidenced to enhance the characteristics of the DT. There are several types of research in which different architectures are proposed for the implementation of DTs in the industry.

However, there are still some barriers to be overcome in the industry so that all the benefits of DTs can be fully exploited in an industrial context [12].

In this research, a DT was implemented in IoT and immersive environments, highlighting the need for better integration, especially in terms of the reliability and security of the data stored in the cloud, as these data determine the parameters and characteristics of the DT. A possible solution to improve security, latency, and resource consumption could be the implementation of nodes, also known as fog computing. This way, data would be processed closer to the field level, allowing the decentralization of the process with multiple fog nodes for each stage. One of the main challenges is to keep digital models fully updated, including changes made during the product development process, to achieve convergence between the physical and digital worlds through technologies.

Several studies have developed different DT methodologies in the industry; however, no implementations combine immersive environments (AR + Senso Glove) with bidirectional communication between the physical and virtual environments. These technologies provide a more immersive collaborative experience for the user, enhancing their interaction with digital environments and increasing the benefits for the industry.

The survey results showed a lower score for the combined use of gloves and AR. This is because both devices can manipulate process variables but not simultaneously due to conflicts with the TAGs. Additionally, the AR environment allows for overlaying digital information onto the physical environment, simultaneously facilitating interaction and the visualization of both the digital and physical entities. On the other hand, the gloves require precise calibration concerning the physical and virtual entities, considering all the parameters of the system components. With proper calibration and user training, better results can be achieved due to the ability to manipulate multiple analog variables with simultaneous hand and finger movements.

DTs and IoT are essential for developing Industry 4.0 as they enhance the capabilities and features of current processes. IoT and DTs focus on resources, enabling communication between consumers and devices to occur directly or through some form of system. Thanks to machine-to-machine communication and the free libraries available in the low-cost devices used in this research, these resources have been effectively utilized to send processed data simultaneously and securely to Meta glasses and Senso Gloves. However, it is essential to consider that

free cloud space is limited, and additional costs may be incurred for larger applications.

The proposed system showed a high consumption of computational resources, and by having immersive environments, the time increases considerably depending on the TAGs used. This is why control must be carried out at the field level and only certain parameters can be controlled from these environments. In addition, by having a large amount of sensor data, a decentralized system with fog nodes for each environment can be proposed to reduce the latency generated. It is observed that the integration of immersive technologies increases the capabilities of the DT; however, the high consumption of computational resources must be considered, which increases according to the amount of data that is controlled from these environments and limits the number of TAGs used, since real-time communication is required.

When running the DT with AR, a high consumption of resources is observed, primarily in processor usage, reaching 62%. The graphics card consumption is also high, reaching 52%. Additionally, the temperature rises to 60 °C at the beginning and continues to increase, causing delays in the visualization of the DT parameters. These values are high despite the capabilities of the PC, which shows that executing the DT in immersive environments requires high processing for better performance. Due to the high resource consumption presented, an analysis of the energy and harmonic distortion was carried out, and the results showed that it does not directly affect these parameters, which is a benefit that enables the avoidance of failures in the control loops. However, a slight increase in the odd harmonics is observed when the system is in an open loop concerning the system with the DT, showing that despite the DT's high consumption of resources, it does not affect the power consumption or increase harmonic distortion. It must be considered that high resource consumption affects viewing times in virtual environments, so high-performance equipment must be available for the implementation of these proposed systems.

The results showed that the system could identify, analyze, and design control system behavior for fault prediction, confirming the advantages of the DT in validating the control system. This shows the potential of using DTs in the industry, and these systems can be applied at all stages of production. From the work carried out, the following advantages presented in the proposals can be highlighted: reduction in downtime, reduction in corrective and predictive maintenance costs, increase in operational efficiency, and creation of safer work

environments. This is due to the ability to model and simulate environments with real conditions.

### **3.2.6. Conclusiones “publicación (2)”**

ISO 23247 provides an architectural framework for DTs that does not prescribe specific formats, technologies, and protocols, thus allowing for the use of various types of immersive technologies and embedded systems; open communication protocols such as MQTT; and the inclusion of ISO 16792 in conjunction with ISO 23247 for the design of the DT, which allowed for improving the 3D model in greater detail. This union of resources and platforms allowed for a successful implementation, and its validation was performed in a modular lab with industrial components.

The results show that the combination of a DT with immersive technologies allows for greater operator interaction with the process and provides new alternatives for setup, monitoring, and decision-making on the production line. This allows for the remote monitoring of industrial processes through a digital interface with AR, providing greater detail with which to visualize supervision states at different product lifecycle stages. This integration expands the visualization and real-time data access capabilities, reducing production times and efforts in training and maintenance and decreasing decision-making errors. Among the advantages presented by the proposed system is a reduction in the time solving errors that may be caused by internal or external disturbances of the process, thereby avoiding production delays.

Using AR and Senso Gloves to achieve greater immersion and interactivity simplifies the interaction between humans and machines and enhances the development of DTs, expanding their benefits in industries. This is due to the constant data transfer, replication of digital processes, reliability, diagnosis, and analysis they offer. Moreover, using these technologies provides a more immersive collaborative experience for the user, improving interaction with digital environments. Regarding the analysis of transmission times, it depends on several factors such as the bandwidth of the network being worked on, latency and network load, and the amount of data that is sent, because MQTT is efficient for small messages. Furthermore, it is observed in the results that the time increases depending on the number of sensors used; this is because when performing the immersive DT, it has a greater consumption of resources. However, this high

resource consumption does not affect power consumption or cause problems in the power grid. Therefore, devices with high performance must be available to prevent time from affecting the operator's decision-making.

### **3.2.7. Referencias “publicación (2)”**

Las referencias de la publicación 2 se puede observar en el anexo 2 donde se añade la publicación completa.

## **3.3. An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes.**

La publicación (3) contribuye al cumplimiento de los objetivos de la investigación de manera directa, en donde se integran las tecnologías y los protocolos que mejores resultados mostraron en las publicaciones y de la experiencia obtenida en los trabajos anteriores realizados por el autor. Aporta directamente al objetivo principal donde la arquitectura propuesta fue implementada en un laboratorio de industria 4.0 que cuenta con un sistema MES y sistemas ciberfísicos, por lo cual cumple con lo establecido en esta investigación y además abarca la integración de nuevas tecnologías y protocolos comúnmente utilizados para el desarrollo de la I4.0.

**Abstract.** The present research proposes the implementation of an architecture for industrial process monitoring and control for a manufacturing execution system (MES) using an immersive Digital Twin (DT). For the design of the proposal, cyber-physical systems (CPS), MES, robotics, the Internet of Things, augmented reality, virtual reality, and open platform communication-unified architecture (OPC UA) communication protocols were used to integrate these technologies and enhance the functionalities of the DT by providing greater performance. The proposed work is implemented in an Industry 4.0 laboratory that is composed of Festo Cyber-Physical Factory and CP-Lab stations. The implementation of the architecture is based on ISO 23247, where the following requirements were considered for the design of DTs: (1) observable attributes and 3D design and visualization of all physical production lines in all of their stages, (2) a

communication entity through the OPC UA protocol for the collection of state changes of manufacturing elements, (3) a DT entity where digital models are modeled and updated based on the collected data, and (4) user entities through the use of AR and VR to make manufacturing more efficient. The experimental results showed that the architecture enables interoperability between different platforms and control subsystems. It allows for the detection and diagnosis of problems during the execution of the production line; in addition, the high-fidelity simulation and AR and VR environments provided by the DT with data obtained in real time can improve the accuracy and efficiency of manufacturing through a more detailed analysis of the process, providing advantages such as interactive creation for customized products and continuous innovation.

### **3.3.1. Introducción “publicación (3)”**

Manufacturing systems are facing a new revolution based on the digitization of assets, processes, and computing capabilities imposed by new data-driven digital architectures. These initiatives emphasize their applications in the manufacturing industry to transform production systems into a new generation of systems that are equipped with CPS characterized by a strong interconnection between the physical and digital worlds. Among all of the enabling technologies of Industry 4.0, the DT is considered to lead the way for cyber–physical integration. With the constant and growing demand for products, several companies have driven forward and adapted to the industrial revolution to face the challenge of decreasing delivery times and having higher quality and product reliability. Therefore, the industry is facing a new revolution, based on the digitization of assets, processes, and computing capabilities imposed by the new data-driven digital architectures [1].

Industry 4.0 drives digital transformation, enabling better operational performance through disruptive technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), cloud computing (CC), CPS, DT, and big data which have contributed to the rapid development of Industry 4.0 [2,3]. Most initiatives emphasize applications in the manufacturing industry to transform production systems into a new generation of systems that incorporate CPS and are often referred to as cyber–physical production systems.

Among all of the enabling technologies of Industry 4.0, the DT is considered to lead the way for cyber–physical integration [4]; this integration is an important prerequisite for smart manufacturing as well as being its core. CPSs and DTs are

the preferred means for such integration and have gained considerable attention from academia, industry, and the government. However, there are open points in addressing cyber–physical convergence in traditional manufacturing enterprises to adapt the existing infrastructure to the growing business needs that demand high efficiency and at the same time the reduction of production costs [5]. This drives digital transformation, allowing greater agility and flexibility of production because it can connect the needs of consumers with the industry through automation systems linked to the planning level and enterprise resource planning (ERP) [6].

In addition, thanks to the ability to work with large amounts of data, using sensors and wireless technologies of connected devices in real-time offers promising digitized solutions in various fields of industry, including management, planning, and the control of production [7], allowing manufacturers to save time, increase productivity, reduce waste and costs. This change in the industry involves not only the digitization of processes but also the creation of smart factories, incorporating information and communication technologies (ICT) for the evolution of the supply chain and the production line [8]. However, it should be considered that the development of these systems in the industry involves high costs and requires the change of production systems in several parts of the production line.

CPS are multidimensional and complex systems that integrate the cyber and dynamic physical world by adding new capabilities to physical systems through the integration of machine tools, manufacturing processes, computation, and communication, where processes and operations can be monitored and controlled in these computational spaces [3]. One concept of CPPS is the cyber–physical DT, which is a system that integrates digital models of cyberspace with physical manufacturing processes and resources. It has appeared in recent years with the advancement of new technologies and as sensors and IT infrastructure have become more cost effective and reliable [9]. However, it should be considered that CPS and DTs are not identical from many perspectives, including their origin, development, engineering practices, cyber–physical mapping, and core elements.

The DT represents the interconnection and convergence between a physical entity and its digital representation, and it can exchange information in real-time in both directions; in this way, the digital entity can control the physical entity and vice versa [10]. There are also hybrid DTs that use a combination of physics-based models, artificial intelligence, and data to create a more accurate tool, which could even be simpler to create if the dynamics are unknown [11]. One of the main

reasons for using a DT is that manufacturers can observe in real time the manufacturing/logistics environment, allowing for optimization and cost reduction. They have the potential to provide real-time status updates on machine and production line performance; plus, they are useful tools for monitoring and control because they provide a framework to support the high demands currently presented during the industrial revolution. By using a DT, mechanical damage during implementation or late detection of the problem in the early stages of the project can be avoided [12].

The contribution of the present work is the implementation of an architecture for the monitoring and control of industrial processes based on an immersive MES and DT system. For the design of the architecture, CPS, MES, robotics, IoT, AR, VR, and industrial communication protocols in OPC UA technologies will be used. To integrate these technologies and enhance the functionalities of the DT, providing greater benefits for users and customers, the proposal will be subsequently validated through experimental tests in the Industry 4.0 laboratory to verify the correct operation and show the advantages and challenges presented by the immersive DT in a continuous production line.

### **3.3.2. Trabajos Previos “publicación (3)”**

This section provides a general description of works carried out by other authors to establish the proposed architectures and the technologies and protocols used for the implementation in the industrial sector. For the selection of the articles, the following aspects were considered: (1) methodologies proposed for the implementation of DTs in the industrial area in the last 5 years and (2) combinations in groups of 2 and 3 of the following keywords: [Digital Twin, Industry 4.0, Virtual Reality], [Digital Twin, Industry 4.0, Augmented Reality], [Digital Twin, OPC UA], and [Digital Twin, CPS, MES]. After selection, 18 articles implemented in the industrial field and using any of the technologies or industrial protocols described in the first paragraph were obtained. It was observed that in the collected works the implementations are not governed by a standard for the design of the DT architecture. Also, three papers were selected at the simulation level because, in the proposal, they used industrial protocols with MES and CPS for their proposals which served as a guide for the union of these technologies. The review will be organized according to the methodological approach, technologies used, and applications to analyze the benefits and challenges of developing such technology.

This review aims to conduct a synthesis and critical analysis identifying the strengths and limitations of the proposals made by other authors, in addition to identifying current trends, developments, and rapid evolution. In this way, the architectures and technologies used are considered in this research according to the results obtained when applying them to industrial processes.

In the first part, articles were selected that showed DT proposals that were implemented in the industry as described below. The authors of [13] present an architecture to perform an adaptive DT; the objective was to show that online optimization and adaptivity can be performed using an early simulation. Within the proposal, there are constrained, dynamic, and autonomous subcomponents that must be considered to associate with any of the state, design, and configuration components and system behavior. The system is implemented in a shoe production process where the results showed that the proposed architecture is suitable for production environments that undergo constant and unpredictable change, whereby obtaining synchronous and asynchronous data obtained from the physical system serves as a basis for such interaction and obtained a continuous production of customized shoes and can continuously reconfigure the design to adapt to new user needs.

In [14], they propose a DT to predict the behavior of products in the first phase of manufacturing by creating a set of DT modules that can be reused and recomposed to create variants of DTs. The case study is performed for two cases, the first one a need of a manufacturer and the second one an industrial case of propulsion systems. In both cases, the results showed how the modular platform design has an impact on the cost of physical and digital definition, if commonality and reusability aspects are considered, in addition to improving the cost effectiveness of applying a modular approach to the creation of DTs. In [15] they propose the integration of a digital shadow (DS) simulation model with an MES, thus creating a DT that has two frameworks, one for error state management and the other for triggering disassembly processes; the system was implemented with the Industry 4.0 Lab MES, Matlab 2023 software was used to perform the simulation environment and the sensor data were sent via an OPC UA protocol and then communicate with the MES via TCP/IP. The results showed that by adding a DS to the MES, the system becomes a DT with bidirectional communication and with the possibility of monitoring and decision-making.

In [16], they produce a DT with object detection using deep learning (ML). The DT was carried out in Siemens NX and an S7 1200 programmable logic controller

(PLC) (Simatic S7-1200, manufactured by Siemens AG in Mexico) was used, which through the OPC-UA protocol communicated the physical and virtual environments; for the ML YOLOV3, the results showed the feasibility of implementing this type of system with ML with an average of 1.083 s to a total signal travel time of 1.338 s. In [17], they propose a DT lifecycle model with methodologies and tools for management using Industry 4.0 concepts, such as the asset management shell (AAS), international data spaces (IDS), and standards such as OPC-UA and AutomationML (AML). For the case study, a sorting station that has industrial sensors and actuators was used and the results showed that it is a generic and flexible architecture based on existing DT frameworks, and since they are open architectures for smart manufacturing, they are key to solving problems of interoperability.

In [18], they developed a DT that has integrated visualization technologies and the simulation of process parameters. The implementation is carried out in a typical machining process, which has an S7-1200 PLC and bidirectional communication based on the TCP/IP protocol, with the simulation module based on finite element modeling (FEM), which was implemented in ANSYS, and the virtual model was developed in Unity. The results showed that the system facilitated the visual representation of microstructural data variations by obtaining and displaying FEM simulated results of real-time stress variations of the workpiece, and these data can be used for real-time control and optimization; in addition, it significantly reduces trial and error costs, minimizing processing errors and facilitating the comprehensive management and optimization of processes.

In [19], they present an architecture that allows for data exchange between remote simulation and the physical twin; the architecture has the following layers: local data, an IoT gateway, cloud databases, and a layer that contains emulations and simulations. This architecture provides a real-time, service-based infrastructure for vertical and horizontal integration and can be deployed in new and legacy production facilities. The implementation was performed on a robotic gripper that has known failure modes; therefore, the ability of a DT to detect anomalies in the functioning of the physical twin will be evaluated. The results showed that by creating six layers, the functions of the proposed architecture can be distributed; however, it must be considered that the latency increases.

In [20], involving a general cloud-based DT framework to support smart manufacturing services, this proposal presents the integration of modularized cloud intelligence, modeling, and visualization to achieve improved remote

accessibility and will be implemented for a manufacturing system for robotic assembly. An RPI card is used to acquire data from the physical process and, using the message queuing telemetry transport (MQTT) protocol, it sends the data to the cloud for the creation of I4.0 services. The results show that the proposal enriches the path to realize cloud-based DT and features cloud intelligence, DT modeling, and web-based DT visualization, providing a feasible solution to upgrade a legacy manufacturing system to a digitalized and intelligent system.

In [21], they propose an architecture using a finite state machine (FSM) to guarantee the functionality of the associated control systems which can be integrated and used for the simulation requirements of a production process. The implementation is carried out through IoT and OPC UA communication integrated into the industrial materials classification production line. The results showed that the proposed solution is suitable for the implementation and design of a physical device and allows the proposed method to be verified before the final implementation; in addition, it presents a flexible design, which ensures the agile development of various parts of the system and the development of individual tasks in parallel. In [22], they propose an architecture to merge SCADA systems with a DT with an architecture based on OPC UA with Ignition software and by adding an RPI card. The proposed architecture consists of a server, gateway, cloud service, and end-user nodes. The results showed that the architecture simplifies system connectivity and reduces the computation cost of process controllers by utilizing a gateway device to perform more demanding processing tasks.

In [23], they present the integration of a DT in a production workshop that has Industry 4.0 technology, where it was considered to perform precise digital mapping with multidimensional, static, and multidimensional characteristics that describe the perspectives of geometry, physics, behavior, and rules. Production data, equipment operation data, production process parameters, and operation parameters were considered. The results showed that the proposed system provides an implementation method and approach for collaborative interaction and iterative operation problems caused by complex coupling in the process industry. In [24], they propose an online modeling and control method for complex assembly processes based on a DT in conjunction with a particle swarm optimization algorithm to dynamically adjust the process parameters. The framework consists of three layers: a physical layer, a DT layer, and an optimal control layer. The physical layer consists of industrial robots, operators, and assembly parts. The DT layer provides high-fidelity, multi-physics, multi-scale simulation and prediction

capability, and finally, the optimal control layer perceives and analyzes the real-time state of the assembly process through DT models in the DT layer to obtain the optimal parameters. considering the precision and efficiency of the assembly. The results show the superiority of the proposed approach compared to the traditional method because it significantly reduces the iteration time and improves the assembly quality.

In [10], they propose a DT focused on self-development, and it will be implemented in an existing production system to develop data following the concept of Industry 4.0. In this way, the cost of starting a very low structure without automation is taken advantage of and the results are obtained in the form of data to analyze it to adapt it with automatic layering systems with maximum efficiency. The design was made based on the automation pyramid for data collection and sending them to the computer and HMI to be shown to the operator. These data are stored in MYSQL the Modbus TCP/IP protocol was used for communication, and through OPC, the data were sent to LabVIEW for real-time monitoring and communication with the HMI. In [25], they realize a DT-based distributed manufacturing system for Industry 4.0 with on-the-fly replanning capabilities powered by AI with the objective of autonomously verifying, interpreting, and executing production plans. The proposed methodology executes the initial plan while the AI searches for more efficient alternatives and sends better solutions to the MES, which updates the new plan during production. The results are shown and validated in a use case using an Industry 4.0 testbed, which is equipped with an automated transport system, renewable energy sources, and KUKA industrial robots. The results showed that it is feasible to encapsulate the Digital Twin (basic digital twin based on the PDDL model) with a scheduler into a new enhanced digital twin (digital twin with AI scheduler), combining the advantage of rescheduling capabilities with a distributed MES.

Subsequently, studies that implement DTs in conjunction with AR or VR applied in the industry were reviewed to establish the architectures and technologies used by the authors in [26], who propose an AR-based DT method for the compatibility verification of building information modeling (BIM) data applied in semiconductor manufacturing (FAB). The system was implemented in Unity-based AR/visual SLAM along with AR Foundation using SLAM, 2D tracking, and local anchoring API in ARCore. The results showed that the implemented system allows for precise adjustment of the AR model and the real object through AR tracking and anchoring technology, improving the compatibility of objects.

In [27], they develop DT in industrial environments, with AR and VR emphasizing the incorporation of other technologies such as system integration, connectivity with industrial protocols, and cloud services to enhance the capabilities of the digital environment. They use the Unity platform as a real-time 3D development tool due to its cross-platform capacity, and for system integration, they use Node-RED and the MQTT protocol. The results showed that the proposed DT provides a more complete understanding of the modeled process, with real-time interaction and dynamic visualization allowing for improved decision-making. In [28], they implemented a DT for the control and monitoring of a process with AR; the system was implemented in a modular production station MPS 500. The architecture consists of a PLC and a Raspberry Pi for sending process data to the cloud using Modbus TCP/IP and the M2M protocol; subsequently, the data are sent from the RPI to Unity for the development of the DT application for visualization and control via AR. The results showed that robust industrial protocols can be used for communication in interaction with AR, in addition to producing a DT with a user-friendly interface.

In [29], they present the design and implementation of an AR-based assembly line for Industry 4.0 applications. For the design, they used Unity to create an interactive and easy-to-use AR application for training, and it was implemented in Festo's MPS-PA. Among the technologies that stand out is computer vision, and a scanner was used to produce a 3D design, and it was later exported to Solid Works. The results highlighted the potential of AR technology for assembly line operations, improving assembly line operations, productivity, and training.

Finally, works were reviewed at the simulation level where the results obtained show the feasibility of improving the processes and can also be implemented in the industry. In [30], they propose an architecture to promote a reconfigurable manufacturing system (RMS) through a DT, where it is proposed to create an integrated platform for simulation and monitoring. In addition, they analyze how the CPS-MES architecture serves the evolution of the RMS; to validate the proposal, they implement it in Unreal Engine 4 (UE4) software where the simulation of planned RMS configurations is carried out; the performance of the configurations is calculated planned, and they obtained the optimized configuration.

In [31], they analyze the asset administration shell (AAS) in terms of structure, components, sub-models, and communication protocols, such as OPC UA and MQTT, or interfaces that allow vertical and horizontal communication. The virtual

production test bench and its implementation are carried out at the simulation level by creating a virtual factory where the tests are carried out, and it was observed that it considerably reduces time and uses relevant standards defined by the user, such as the names and attributes of the parameters. In [32], they propose the realization of a DT based on the DT definition language for data exchange with any application that complies with the open platform unified communications architecture; they use OPC UA to structure in DT definition language (DTDL). The implementation of the model was carried out at the simulation level.

The literature reviewed shows several trends; first, we will highlight the limitations and challenges encountered, where it was observed that most of the works presented are not governed or based on a standard for the design of the DT architecture; with it being a form of technology that is under development, there are open proposals for both the design of digital entities, communication, and the data collection of physical environments. It was also observed that the proposals do not include an analysis of security, latency, and resource consumption, which are important factors in the industry. However, being a developing technology, the “ISO 23247” standard [33] in force for the development of DTs in the industry does not present restrictions regarding the use of technology, platforms, and communication protocols used for their implementation.

It was observed that the most used protocols for communication are OPC UA, TCP/IP, and MQTT, which allow bidirectional communication and can be used at different levels of the automation pyramid, allowing for horizontal and vertical integration according to the required need in the processes. On the other hand, several trends and enabling technologies for the development of this technology and the interoperability that can be achieved between different platforms to design DTs are evidenced. Table 3.5 shows the nine papers that are considered relevant for this research because the proposed architectures used for industrial protocols for bidirectional communication were implemented in industrial case studies and show the process for the integration of said technologies and protocols.

Tabla 3.5 Lista de los artículos más relevantes con arquitecturas implementadas en la industria.

<b>Paper</b>	<b>Protocols</b>	<b>Implementation</b>
MES-integrated digital twin frameworks	OPC UA and TCP/IP	Industry 4.0 Lab

Digital Triplet Approach for Real-Time Monitoring and Control of an Elevator Security System	OPC UA	Elevator
Methodology and Tools for Digital Twin Management—The FA3ST Approach	OPC-UA and AML	Classification station
A Digital Twin Platform Integrating Process Parameter Simulation Solution for Intelligent Manufacturing	TCP/IP	Machining process
A six-layer architecture for the digital twin: a manufacturing case study implementation	OPC UA	Robotic gripper
IIoT Device Prototype Design Using State Machine According to OPC UA	OPC UA and MQTT	Production of industrial materials
An OPC UA Client/Gateway-Based Digital Twin Architecture of a SCADA System with Embedded System Connections	OPC UA	Laboratory MPS 500
An Approach to Develop Digital Twins in Industry	Node-RED, MQTT, and Modbus	Robotic cell
Digital Twin to Control and Monitor an Industrial Cyber-Physical Environment Supported by Augmented Reality	Ethernet and M2M	Classification station MPS-500

It is also evident that the use of AR and VR increases the capabilities of the DT in the industry. Among the main advantages is the interaction and experience that AR provides to the user, while VR allows for more realistic simulation environments based on the data acquired from the process in real time. Among the types of software used, Unity provides several advantages to implement the DT, and the communication protocol used is MQTT due to its ease and performance; in addition, there is Node-RED, which is an open-source development tool based on programming.

Finally, from the works reviewed at the simulation level, we can highlight mainly the proposal of integrated platforms for monitoring and simulation with the use of industrial protocols. The proposed DT systems show that the main advantages of using DTs in the processes can be applied to the field, control, and management levels. The results show a considerable time reduction in the processes and optimization in the processes by being able to perform an early simulation with real data.

In the present research, the implementation of an architecture for an immersive Digital Twin in an MES under the ISO 23247 standard will be carried out. It will be supported with AR, VR, IoT, CPS, and OPC UA protocol technologies. It is hypothesized that the proposed architecture will allow for the integration of these technologies to increase the capabilities of the DT, providing greater benefits to users through a friendly and flexible interaction between physical and virtual entities, with the aim of improving the efficiency of processes and decision-making in real time.

### **3.3.3. Metodología “publicación (3)”**

To establish the architecture of the immersive DT in an Industry 4.0 environment for process monitoring and control at both plant and management levels, the present work is based on the ISO 23247 standard, which was published in 2021 by the ISO TC 184/SC 4 committee to standardize an architecture framework to support the creation of DTs for manufacturing applications.

It should be considered that the type of manufacturing supported by ISO 23247 depends on the standards and technologies available to model the observable manufacturing elements. Therefore, it provides an open framework to use different technologies where different domains can be used for the data, i.e., the standard does not prescribe specific data formats or communication protocols. The framework guides the development of a DT and is composed of four application layers [33].

ISO 23247-1: Principles, concepts, limitations, and general requirements for the development of Digital Twins in manufacturing.

ISO 23247-2: Model architecture with reference functional views based on domains and entities.

ISO 23247-3: List of basic information attributes for observable manufacturing elements.

ISO 23247-4: Technical requirements for information exchange and protocols between entities within the reference architecture.

The proposed work implements an architecture of an immersive DT of the industry 4.0 laboratory that is composed of the Festo Cyber–Physical Factory (CPF) and CP-Lab stations, which allows for the monitoring and control of the processes in addition to schedule orders and specifying the configuration of the product from

the digital environment. The complete cell phone assembly process must be carried out in the two stations where in the CP LAB, the assembly of the bottom part of the phone is carried out, the plate is added, the elements are added according to the order, quality control takes place through artificial vision, and finally, there is the inventory. In the CP Lab, meanwhile, the top cover is placed, sealed using pressure, and classified according to the user's request. For the implementation of the proposed architecture and to be based on the ISO 23247 protocol and its layers, the following structure will be followed: (1) realization of the 3D design and visualization of all physical production lines in all of their stages and of the available resources in the cyberspace model, (2) establishment of bidirectional communication with the existing manufacturing system through protocols such as Node network and OPC UA, (3) communication of the physical and virtual environments for obtaining real-time data from all stages of the process and thus establishing monitoring and parameter settings from the physical or virtual environments, and (4) performing simulation, configuration and optimization experiments with the DT in the CP lab and CP Factory from the physical and virtual environments.

The proposed architecture of the immersive DT will be implemented in the Industry 4.0 laboratory to extend its functionalities, data, and bidirectional communication. The wireless data will be collected throughout the production cycle to allow for history, simulation, and data analyses for optimized decision-making and thus increase the advantages of the current MES implemented in the laboratory.

Within the hardware and software used in the architecture, the following are used: (1) Industry 4.0 Lab, (2) TIA Portal software for PLC programming and configuration, (3) Blender and Solid Works for the design of the 3D virtual environment, (4) Unity which allows for the development of AR and VR applications and is compatible with multiple platforms such as Linux, Android, Windows, iOS, and Android, and (5) the OPC UA protocol that enables bidirectional communication based on client/server and publish/subscribe communication models and provides a semantically enriched information model to represent data. The steps for the proposed architecture are described in detail below.

### 3.1. Digital Twin Implementation

The Industry 4.0 Lab is a modular, flexible, and open training system that allows for the improvement of cooperation and skills in different areas due to its network,

communication, and data acquisition systems. It consists of the following modules: CP Lab Conveyor, CP Factory basic module Branch, CP factory AS/RS for pallets, CP factory robot assembly with artificial vision, CP application camera inspection, and a Movil robot for workpiece carriers. The stations are equipped with the PLC “CPU 1512SP-1 PN for SIMATIC ET 200SP based on S7-1500 CPU 1513-1 PN” which is a PLC with medium requirements in terms of program volume and processing speed, for distributed configurations via PROFINET IO or PROFIBUS DP, as well as PG/OP communication, open IE communication (TCP, ISO-on-TCP and UDP), web server and S7 communication (with loadable FB), and OPC UA (Client/Server). For the proposed architecture, the MES implemented in the laboratory is used via the OPC UA protocol as a server for the bidirectional communication for the proposed DT and with Node-RED as the OPC UA client for sending data to the cloud and subsequent communication with AR and VR as shown in Figure 3.22.

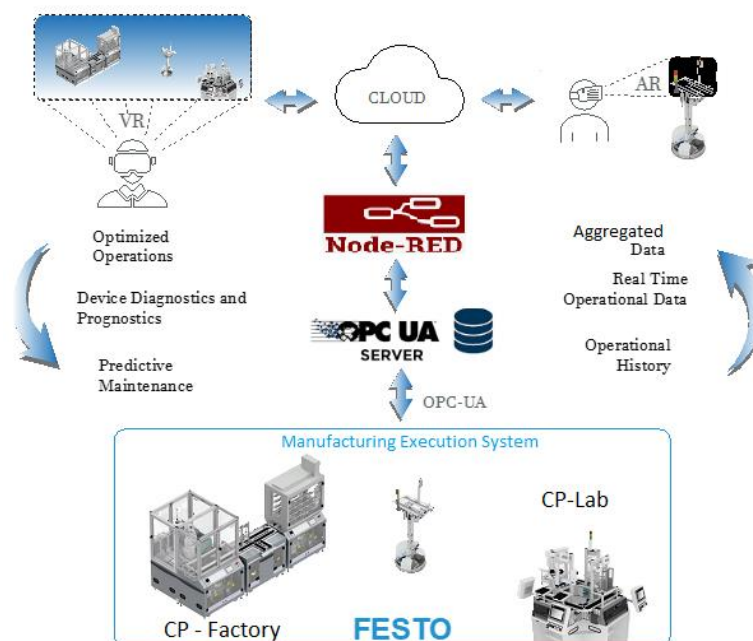


Figura 3.22 Arquitectura DT inmersiva para MES.

To implement the communication of the proposed architecture, the platforms shown in the class diagram in Figure 3.23 will be used, where the process data are sent through the OPC UA and Node-RED protocol to the cloud and then these data will be displayed on the PC screen and will also be used to create monitoring and control applications in virtual and augmented reality environments. The packages

and libraries used for the bidirectional communication in each of the stages are also detailed; in later sections, each of these stages are explained in more detail.

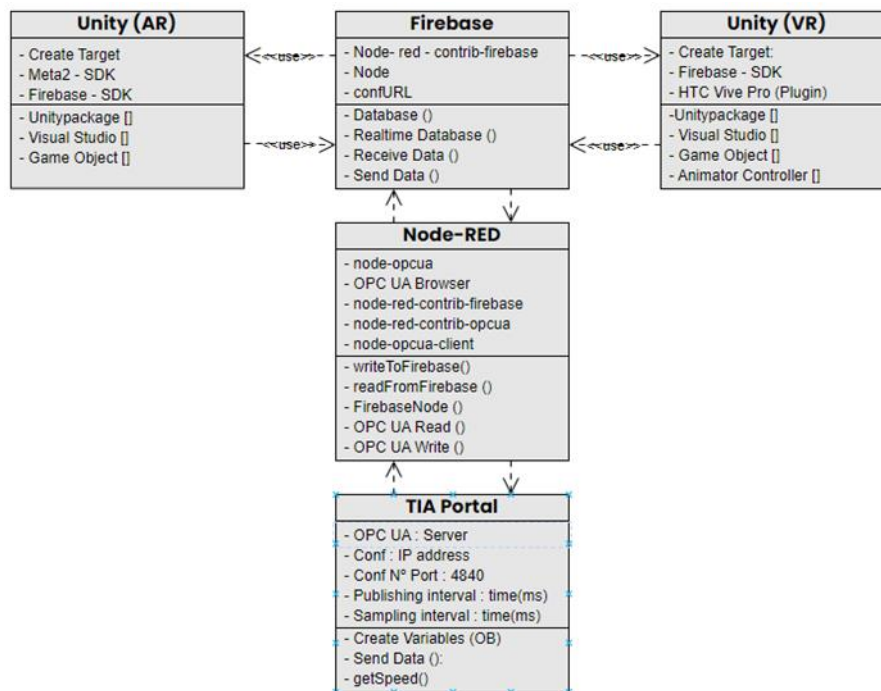


Figura 3.23 Diagrama de clases de comunicación para la arquitectura propuesta.

The programming and configuration of the stations were performed using TIA Portal software where it should be considered that there is a large data volume in the stations; therefore, within the programming, the main blocks to be used are: organization blocks (OB), which is used to control the flow of the program because they allow for processing cyclically and also allow for data communication between different levels defining the behavior of the system; in the proposed DT architecture, they are used for the start, end, and synchronization events of the models. Function blocks (FB) are a reusable block that allows the storage of data permanently to perform a specific task; these data are available at any time or stage in the proposed architecture and are used to represent different components (sensors, actuators, etc.) of the DT, giving greater flexibility when simulating the behavior of that component. Data blocks (DB) store important data for the operation of the process, in the presented framework they are used to store the real-time information of the DT components. In addition, these blocks are used to send the information to the Node network for further processing and visualization. Function is used to perform complex calculations and additional operations required by the DT to make decisions based on data and process states. The

network topology was configured using TIA Portal where the stations communicate through the profinet protocol and then, these data are sent through the OPC UA and Node network to interact with the DT. Figure 3.24 shows the topology of the devices and networks used in the proposed architecture.

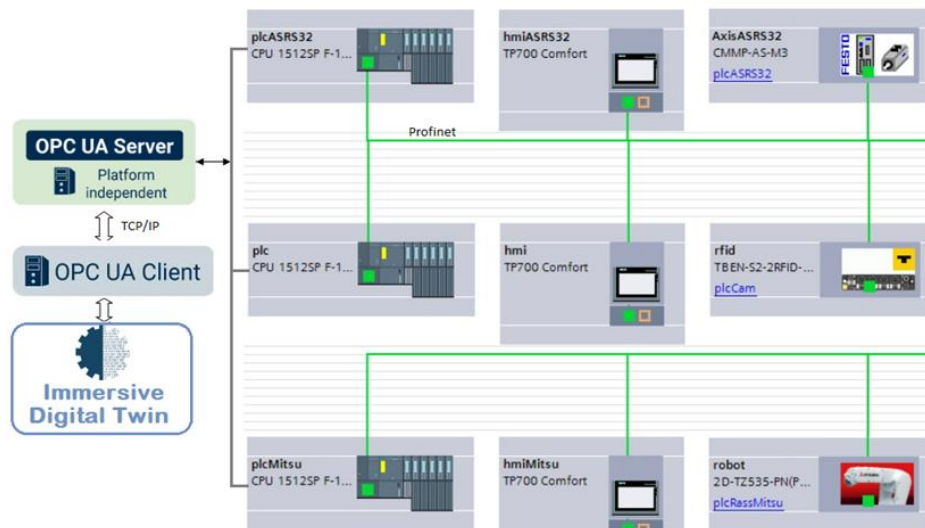


Figura 3.24 Topología del dispositivo y de la red del DT.

### Development of the Digital Environment

The creation of the digital environment was based on the ISO 23247-3 standard and was performed in the Blender and Solid Works environment, which is a type of software used for modeling and creating 3D content, in addition to having the option of rendering, modeling, and animation, making it perfect for interaction with AR and VR, allowing for the creation of 3D models to map the physical and kinematic properties of the elements and devices of the plant, and subsequently, with the Unity engine, they are exported to create animations in real-time. They also have high performance and enough libraries and communication protocols to interact with different devices and subsequently define the coupling of movement depending on the processes. The simulation module was developed as a virtual model, which is a representation of the production lines and physical resources, which are connected and synchronized with the physical entity in real time through data received from wireless sensors and simulation data. Figure 3.24 shows the sequence to carry out the digital design of the stations, which is carried out through the following process: (1) add the required station models to Ciroso Studio V 6.2, (2) export the environments with the extension STP to Solid Works, (3) export the files in STL format files to Blender where the editing for the

simulation is performed and the elements are increased according to each station to achieve a more faithful finish of the physical design, and (4) the digital model file is integrated into Unity, with the programming that will allow for the establishment of bidirectional communication and synchronization between the physical twin and the DT.

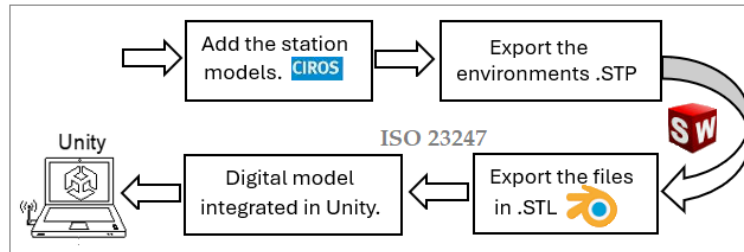


Figura 3.25 Secuencia para realizar el diseño digital de las estaciones.

### OPC UA Communication

The configuration of the OPC UA protocol is carried out using TIA Portal software where the following steps are performed: OPC UA server activation, IP configuration, communication port configuration, DB block creation, OPC UA server interface creation, sampling, publication times configuration, and finally, security configuration.

It should be considered that the DB blocks are used to store the information of the DT components, so all of the variables to be used in the DT should be created and one should make sure to activate the accessibility to them to guarantee the communication between the different environments. In addition, when selecting the server interface, the variables to be transferred to the client must be selected and an ID node will be observed for each enabled variable; these variables will be used for communication from Node-RED. Figure 3.26 shows the OPC UA communication diagram used in the proposed DT architecture.

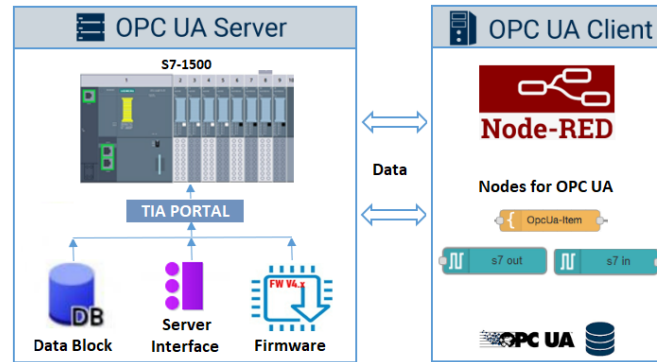


Figura 3.26 Arquitectura Digital Twin inmersiva para MES.

The OPC UA protocol is used because it allows for bidirectional communication between different platforms and levels of the automation pyramid, in addition to communicating with devices from different manufacturers. The client–server architecture is used because it is compatible with the OPC UA communication framework and implements a security layer with authentication, authorization, encryption, and data integrity. As field devices become more powerful in terms of CPU and memory performance, there is a trend to incorporate OPC UA server functionality within field devices to provide direct data access to external OPC UA clients [34].

### PLC Communication with the Node Network

The programming and configuration of the PLC were carried out using TIA Portal software where the programming of the entire process is carried out for each of the stations. The PLC used is the S7-1500 where the input and output modules used in the process are configured. Through Node-Red, one can interact with the information from the PLC and in this way obtain real-time data from the DT with bidirectional communication for monitoring and configuring the process. For communication between the PLC and Node-Red, the TCP/IP, MQTT, OPC UA, etc., protocols can be used.

The proposed architecture is shown in Figure 5 where OPC UA is used and the PLC is configured to act as an OPC UA server, and the nodes and TAGs that will be sent to Node-Red are also defined. In Node-Red, the nodes are installed for communication with the OPC UA protocol. In our case, “node-opcua” and “OPC UA Browser” were used. Subsequently, the connection is established by configuring the IP, cycle time, specific port, slot, and rack; these parameters are established to have an ordered identification of the variables received in node-red. The PLC TAGs must be translated into the format required by the new instances, and specific URL

addresses can be used for each interaction. Subsequently, each OPC UA node belongs to a class called NodeClass where the common attributes of the OPC UA nodes are defined as shown in Figure 3.27.

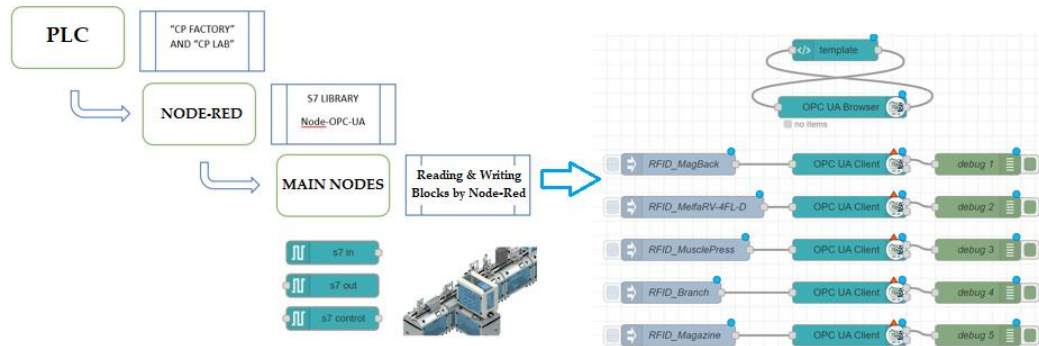


Figura 3.27 Comunicación del proceso con OPC UA y Node-RED.

Once one has the information in Node-Red, the data are sent to the Firebase cloud. In the cloud, a project name and location are configured, and the database and security that will also be used are configured. While in Node-Red, the configuration is carried out to send the data obtained from the process to Firebase; first, the cloud libraries used, in this case “node-red-contrib-firebase”, must be installed and then, the configuration is carried out of the Firebase nodes where data writing and reading operations are established.

Once the sensor data are in the Firebase cloud, the configuration is processed with Unity to create the DT applications with AR and VR. First, the Firebase SDK is installed in Unity software, which allows for communication between the platforms, and then, communication is carried out using the TAGS used in the programming to link with the virtual environments that were previously designed to make the animations based on of the process and data obtained. Finally, the sending of data from Unity to Firebase is configured to provide feedback and control the process from both physical and virtual environments in real time.

### 3.3.4. Resultados “publicación (3)”

To validate the results, 3 approaches will be used. The first consists of implementing a continuous production flow and subsequently generating internal and expert errors controlled and caused by an operator to compare the response times of the system with the conventional MES vs. the system with the DT-MES. The second validation tests the AR and VR environments with the DT and an

interaction is carried out with all of the elements of the manufacturing cell for the supervision, simulation, and control of certain parameters. In the third validation, the transportation times between the stations are measured, for which several obstacles will be placed between the stations and the mobile robot will have to trace the most optimal route obtained with the simulation models and will measure the times in the traditional system and the proposed system.

### **Conventional MES vs. the System with the DT-MES**

To analyze the results of the proposed architecture, the generation of errors in the process was carried out where error states occurred in different scenarios in the production cycle of the MES.

Twenty orders are made from the conventional MES with different characteristics, and during execution, three errors are generated: (1) turning the plate, (2) changing the transport carriage, and (3) removing a fuse from the assembled plate.

Subsequently, the same number of orders, characteristics, and the same errors are generated as in the conventional system; however, the system works with the proposed DT-MES architecture.

During testing, the time it takes to complete the requested order after the generation of failures is measured. In the first case, the operator waits until one of the sensors at the next station where the product arrives generates an error and this is solved by intervening. In the second case, the digital system warns of the error, and the DT provides the opportunity to visualize the digital environment and replicate the behavior of the physical environment in real time, as shown in Figure 3.28.

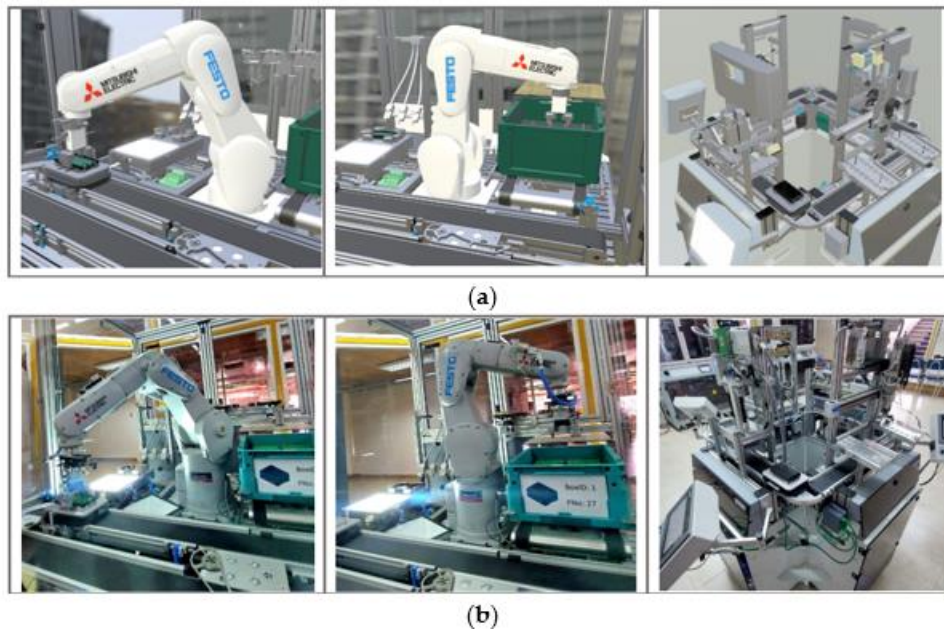


Figura 3.28 Línea de producción de Digital Twin-MES; (b) Línea de producción MES.

After taking the times in which each of the processes is carried out for each of the cases, the results shown in Figure 3.29 are obtained, where it is observed that these times are decreased by a total average of 40.2 s, which represents a percentage improvement of 14.2%. These results show that the proposed architecture provides the possibility of streamlining production and reducing downtime generated by internal or external disturbances that may occur during production.

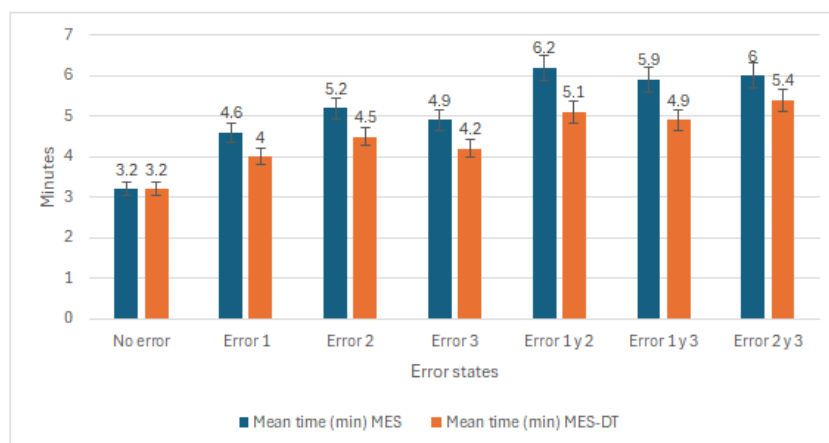


Figura 3.29 Análisis de respuesta a errores causados por el usuario.

To validate the AR and VR environments with the DT, an interaction is carried out with the elements of the manufacturing cell for the supervision, simulation, and control of certain process parameters. The system was implemented on the Unity platform where it works with the real-time data that arrive from the process; Meta 2 glasses for AR and HTC VIVE glasses for VR are used, which allow for interaction and visualization with the physical environment in real time. The AR application allows additional information to be observed so that the operator can interact with the virtual environment and allows for control of certain parameters from the glasses, enhancing the experience. In the application with VR, the operator can control and monitor the physical machine remotely through a virtual reality helmet, which provides greater mobility at work and, at the same time, maintains an immersive experience as seen in Figure 3.30.



Figura 3.30 Entorno físico y virtual con AR y VR.

Both AR and VR allow users to visualize 3D environments in an immersive way as seen in the previous figure, thus allowing for a better understanding of the process and optimization thanks to the fact that complex processes can be simulated with data obtained in real time and errors can be identified and corrected more quickly as observed in Figure 8.

Among the benefits that were evidenced by integrating AR and VR technologies in conjunction with a DT are (1) an immersive visualization and control system in real time with which users can interact and have a deeper understanding of the production line for a more accurate decision-making, (2) simulation of different scenarios and possible conditions with the real data obtained from the flexible production line, thus testing different configurations and possible evaluation of the results, and (3) optimization of the process; thanks to the benefits mentioned in (1) and (2), it is possible to achieve faster identification of errors and make more accurate configurations by knowing and understanding the process in a more real

and interactive way. In addition, one of the advantages of using these technologies in the DT is that it allows for the control and visualization of the process remotely and allows for an improvement in the customer experience because it is possible to customize products according to each need without increasing production costs and with friendly systems for operators and customers. It can also be used for the training and education of operators both in industry and in the classroom where these environments allow for greater interaction and simulation with real parameters, which favors learning in technical areas.

### Communication between Stations

To transport the phones between the stations, a robot that has a Lidar sensor model SICK-S300 generates the mapping and takes the best route. This mapping can be visualized in the Virtual environment and helps the operator to know the possible routes, and thanks to the continuous data received, they can plan new routes based on the conditions that can be simulated or mapped before executing the trajectory. First, the creation of a new map is carried out; by default, Robotino Factory places a brief environment in space and the user configures the environment by moving the Robotino, where it is necessary to move in all possible directions for the Lidar sensor to start performing the mapping of the physical environment and all the objects that are around it; in this way the workspace is established. It is important to consider that the minimum and maximum height must be considered when mapping. Furthermore, the system implemented in the MES allows for obstacle avoidance as shown in Figure 3.31.

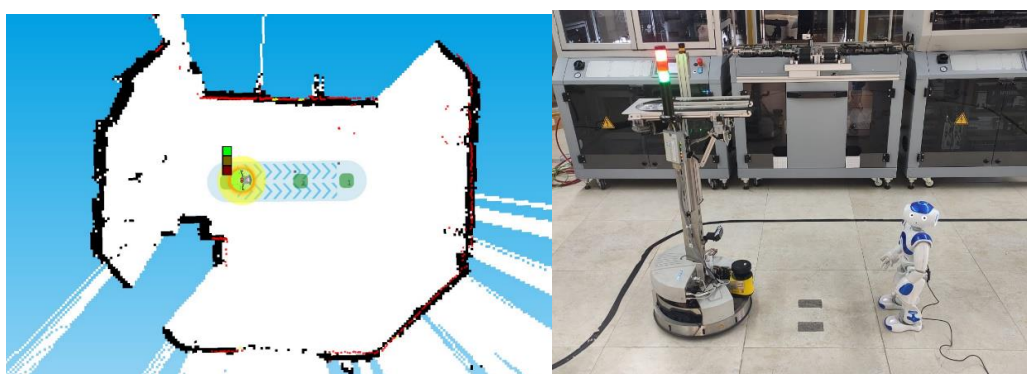


Figura 3.31 (a) Mapeo digital y (b) Entorno físico para evitar obstáculos.

When performing the trajectory analysis with the obstacle avoidance system of the conventional MES vs. the MES with the DT, it was observed that there is an improvement in route times, whereby several tests were considered by placing

obstacles in the trajectory. This is because, in the conventional MES, there is a fixed distance that is programmed when an obstacle is detected. In the new system, this distance can be configured through tests carried out in the digital environment, and depending on the characteristics of the obstacle and based on the data obtained in real time, the avoidance distance can be configured. The results of the tests carried out are seen in Table 3.6.

Tabla 3.6 Análisis de tiempos de evitación de obstáculos para el MES vs. el DT-MES.

Scenario with Several Obstacles	Mean Time (s) MES	Mean Time (s) DT-MES	Reduction in Time (s)	Reduction in Time (%)
0	25.3	19.6	5.7	22.5
1	37.5	28.1	9.4	25
2	46.1	35.2	10.9	23.6
3	59.8	47.8	12	20
4	75.3	62.1	13.2	17.5
5	87.2	71.4	15.8	18.1
0	25.3	19.6	5.7	22.5

As seen in the previous table, there is an average time reduction of 21.1% of the proposed system; this is because thanks to the data received by the DT, it can simulate trajectories and configure the parameters for evasion based on the characteristics of the obstacles presented, which represents a significant advantage and therefore an increase in production. The statistical distributions for the percentage of time reduction can be observed in the histogram of Figure 3.32, where it can be observed that the time reduction is almost similar in all cases regardless of the number of obstacles that are presented, this is due to the operation performed by the DT.

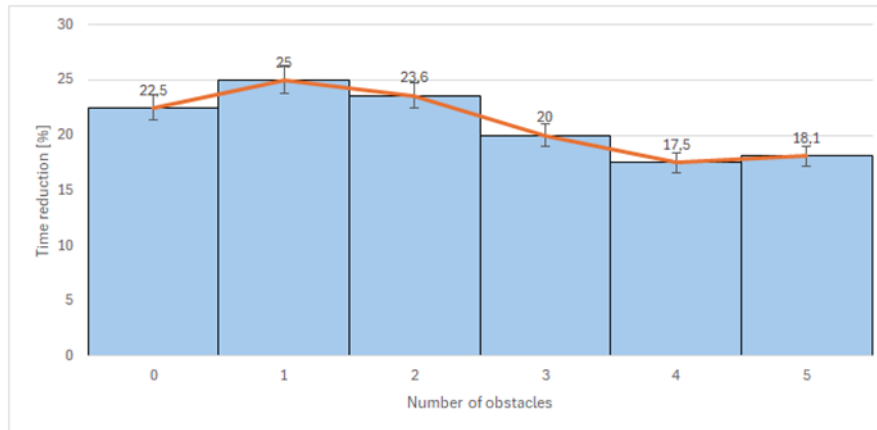


Figura 3.32 Histograma del porcentaje de mejora del DT-MES.

### 3.3.5. Discusión “publicación (3)”

From the literature reviewed, it is evident that the development of DTs has been growing constantly in different industries and universities due to the characteristics, advantages, and opportunities it presents. However, there are still several challenges such as latency, architecture standardization, and transparency protocols, among others. In 2021, the ISO committee published ISO 23247 to standardize an architectural framework to support the creation of DTs for manufacturing applications. However, it is an open framework that allows for the use of different technologies and does not prescribe specific data formats or communication protocols. It should also be highlighted that the review carried out highlights that among all the enabling technologies of Industry 4.0, the DT is the one that leads the way for complete cyber–physical integration, whereby it facilitates the integration of human–machine knowledge in different industrial cyber–physical contexts quickly and flexibly.

The present study has shown the implementation of an architecture for the implementation of DTs in Industry 4.0 where methodologies were defined to integrate new-generation and legacy equipment, several platforms were used to allow for horizontal and vertical integration of the system. The architecture was tested in an Industry 4.0 laboratory where the proposed framework for the DT was based on the ISO 23247 standard and its four application layers. The requirements that must be adhered to in the design of a DT were considered: (1) observable attributes of the manufacturing elements, that is, the elements that must be modeled, (2) the communication entity of the device that collects the state changes of the elements observable during manufacturing processes, (3) DT entities where

the models of the DTs are modeled and updated based on the collected data, and (4) user entities which are applications that use DTs to make their manufacturing more efficient.

In addition, it should be emphasized that the proposal presented can be implemented in both open-loop and closed-loop systems. For digital design, it is suggested to use preset designs from a manufacturer which can then be edited and adapted to the characteristics required for the system or standard used; one can also make the 3D design of the virtual environment from scratch, and it is recommended to complete this in software that allows saving in .stl extension format for subsequent simulation and interaction through Unity with the physical environment. Regarding the physical environment, PLCs or low-cost embedded systems can be used in the control stage to control and send data from the sensors and actuators of the process; among the most used protocols that allow for bidirectional communication are OPC UA and MQTT. Finally, to allow for greater interaction with virtual environments, process data can be sent to the cloud, and from there, they can be managed for bidirectional interaction with any AR or VR technology; it is suggested to consider the number of TAGs used due to the high consumption of resources and amount of data to be processed.

The results show that the combination of immersive DT with an MES for automation and supervision increases the characteristics of these systems at both the field, process, and management levels. Where there is a virtual representation in real time with simulation and interaction capabilities between the physical and virtual entities, this allows for a faster response to internal or external disturbances that may occur during the process. This ability to model and simulate possible scenarios with real production line data allows one to reduce downtime and improve decision-making. It was also evident that the DT adapts to existing production systems to create digital data compatible with the MES; in this way, these systems can be linked. Through this integration, the process is monitored with greater efficiency and optimization, which means the total integration of digital and physical systems.

AR and VR in conjunction with DTs are innovative technologies that offer realistic environments, thus generating an immersive and interactive experience for the operator and clients, increasing the understanding of the systems, and therefore having greater precision for decision-making and reducing errors by the operator, which has a direct impact on planning and improving productivity. In addition, these systems can improve the training of operators and be used in the classroom

where they allow for greater interaction and simulation with real parameters, which favors learning in technical areas. Another aspect of the results analyzed was the transportation stage between stations; this is carried out with a mobile robot that has a Lidar sensor for mapping. It was observed that the information received from the physical environment can be used for different characteristics to obtain the trajectory through simulations that are more optimal and, in this way, reduce the time required. It should be considered that one of the factors that affects transport time is the angle of vision that the robot has toward the obstacles. This angle depends on the initial and final positions in which the robot is located at the beginning and end of the process.

Some limiting factors that were revealed during the results of the study were the high consumption of computational resources and the latency presented in the cloud connection because it directly depends on the quality of the Internet. This is due to the large amount of data that the MES sends and because these data are collected from the cloud to develop AR and VR applications. To solve this problem, the main parameters that will be sent for monitoring and control from the immersive environments were selected and, in this way, communication times were reduced; also, when controlling from the virtual environment, this was immediately reflected in the physical environment and vice versa.

Within the protocols used for communication between the different levels and platforms, robustness and bidirectionality were mainly considered. Furthermore, it should be considered that the choice of a protocol also depends on the characteristics of the physical equipment. In our case, it is advantageous to use the OPC UA industrial standard because it guarantees compatibility and variability in addition to having fluid interfaces and communication in I4.0 processes, allowing communication between different devices.

However, the implementation of DTs in Industry 4.0 still presents several challenges that must be addressed, among which are: (1) the complexity and distribution of the networks that communicate the management levels due to the integration of technologies and security that the data must have, (2) performance problems that the simulation of immersive DTs has due to the high consumption of computational resources that they present, and (3) interoperability and the integration of systems and data between platforms.

### **3.3.6. Conclusiones “publicación (3)”**

The experimental results of the proposed architecture of the DT with the MES show that the system allows for interoperability between different control subsystems, improving the management and analysis of the processes through the devices of the manufacturing system. In addition, the DT allows for the detection and diagnosis of problems during the execution of the process because in the industry one of the problems presented is the internal or external disturbances that the production line may have, which generates downtime; however, thanks to the advantages of DTs, these errors can be identified faster than in the conventional system, considerably reducing times as shown in Figure 8.

Through the high-fidelity simulation and AR and VR environments provided by the DT with the data obtained in real time, manufacturing precision and efficiency can be improved through a more detailed analysis of the process, providing advantages such as interactive creation for personalized products and continuous innovation. It can also be used for the training and education of operators in industry and students in the classroom because they are interactive and safe environments, and thanks to the features, decision-making is improved, which directly benefits the optimization and performance of the production.

One of the main reasons why the OPC UA protocol was used is because of its flexibility because it allows for horizontal and vertical communication between subsystems at different levels of the automation pyramid. Therefore, by having management, process, and field levels in the MES, the protocol allows the data to be easily obtained to be sent to the DT and can allow for bidirectional communication between the physical and virtual entities.

### **3.3.7. Referencias “publicación (3)”**

Las referencias de la publicación 3 se puede observar en el anexo 3 donde se añade la publicación completa.

## 4. Discusión

De la literatura revisada se evidencia que el desarrollo e investigación de Digital Twin ha venido creciendo constantemente en industrias y universidades por los beneficios y oportunidades que presenta, donde se destaca que entre todas las tecnologías habilitadoras de la I4.0, se considera que el Digital Twin es el que marca el camino para una integración ciberfísica completa debido a que facilita la integración del conocimiento humano-máquina en diferentes contextos industriales de manera rápida y flexible. Sin embargo, al ser una tecnología que se encuentra en desarrollo se ha evidenciado que existen desafíos que deben ser superados como: latencia, estandarización de arquitecturas y protocolos de comunicación.

Se evidencio que la mayoría de las aplicaciones en la industria no se basan a una norma a pesar de las oportunidades que brinda dicha tecnología. Dentro de las arquitecturas propuestas por otros autores se tiene que están trabajando en arquitecturas centralizadas que procesan toda la información en un solo punto y distribuidas que utilizan nodos interconectados para repartir el procesamiento, sin embargo, cada una de estas presenta sus respectivas ventajas y desafíos, estas arquitecturas constan principalmente de 4 capas que son: la percepción, la comunicación, el procesamiento y la interacción. Respecto a la convergencia entre el DT y los entornos inmersivos se tiene la sinergia entre estas tecnologías puede incrementar las capacidades visuales, analíticas y predictivas en el DT, sin embargo, se tiene aún varios retos técnicos que deben ser superados. Por otro lado, se tiene que el impacto tecnológico e interacción con el ser humano está creando una nueva transición hacia la industria 5.0, donde los entornos inmersivos pueden desempeñar un papel muy importante para la personalización de productos y colaboración del humano con la maquina y viceversa.

Para el diseño de arquitecturas es importante basarse en la integración de estándares para proporcionar un marco completo para el diseño, gestión y evaluación. Por estos motivos se han considerado en la presente investigación los estándares ISO/IEC/IEEE 42010, 42020, 42030 e ISO 23247.

En la primera parte se considera el estándar ISO/IEC/IEEE 42010 [61], que especifica los requisitos sobre los elementos de descripción de la arquitectura, comprendiendo los conceptos fundamentales de todos los elementos que componen

las entidades físicas y virtuales del DT como: elementos constituyentes, interacciones entre sus elementos, interacciones entre los entornos, comportamiento, estructura, principios que rigen su diseño, uso, funcionamiento y evolución.

Posteriormente mediante el estándar ISO/IEC/IEEE 42020 [60], que proporciona las pautas para la gestión de la arquitectura mediante un modelo de referencia, se estableció la arquitectura para permitir que la aplicación pueda ser utilizada en una variedad de contextos y situaciones que se presentan en cada proceso. Permitiendo la incorporación de los componentes, las relaciones entre los componentes y las relaciones entre las entidades y sus entornos lo cual permite tener una mejor gestión entre las entidades físicas y virtuales. Además, se debe considerar que los sistemas pueden ser independientes o integrados donde pueden variar en términos de propósito, aplicación, complejidad, tamaño, adaptabilidad, ubicaciones, duración de vida y evolución. Además, estos sistemas pueden configurarse con uno o más de los siguientes elementos del sistema: hardware, software, datos, humanos, procesos, procedimientos, instalaciones, materiales y entidades naturales.

Otro de los estándares considerados en la investigación fue la norma ISO 23247 [10], que fue creada con el propósito de estandarizar un marco de arquitectura para respaldar la creación del DT en aplicaciones de fabricación. Sin embargo, es un marco abierto que permite el uso de diferentes tecnologías y no prescribe formatos de datos ni protocolos de comunicación específicos. Además, la definición de DT sigue siendo abstracta y dependiente del contexto, por lo que aún quedan algunas barreras que superar en la industria para que todos los beneficios del DT puedan explotarse plenamente en un contexto industrial. Por esta razón es importante la integración con otros estándares, para que el diseño y uso de una arquitectura sea suficientemente completa y correcta para los usos previstos.

Finalmente se considera el estándar ISO/IEC/IEEE 42030 [68], el cual especifica los requisitos sobre un marco de evaluación de arquitectura y sus elementos. La evaluación de la arquitectura es más útil cuando se centra en áreas de alto riesgo o en preocupaciones particularmente fuertes que pueden tener los sistemas. El marco de evaluación de la arquitectura para el DT se basa en los siguientes objetivos: evaluación de valor, análisis arquitectónico, valoración del usuario y análisis del sistema.

En la presente investigación se pudo evidenciar que el uso de arquitecturas normalizadas está empezando a ser utilizada en diferentes industrias, sin embargo, estamos lejos que sea adecuadamente utilizada en la creación de DT. Además, se evidencio que las arquitecturas actuales se centran únicamente en cumplir los aspectos funcionales, descuidando las entidades como la seguridad y mantenimiento. Por otro lado, se evidencia que la norma ISO 23247 al ser una norma abierta no brinda soporte para el almacenamiento de datos y control de versiones que ya se encuentran implementadas. Es fundamental basarse en una norma para abordar los desafíos actuales que presentan las industrias, como la interoperabilidad y la capacidad de evolución, que son puntos clave que deben ser resueltos en conjunto por diferentes organizaciones o colectivos.

En el estado del arte realizado se observó que la mayoría de los trabajos presentados por otros autores no se basan en un estándar para el diseño de arquitecturas del DT, sin embargo, se puede destacar las tecnologías y plataformas utilizadas entre las cuales se tiene: para el diseño de entornos 3D utilizan diversos softwares CAD, entre los principales se encuentran Blender y Solid Work, para la comunicación bidireccional los protocolos más utilizados son OPC UA, TCP/IP, AMQP, MOD-BUS y MQTT y finalmente la adquisición de datos del proceso se obtienen mediante PLC o sistemas embebidos [23][69][70].

Gracias al rápido y creciente desarrollo tecnológico y transformación digital que están atravesando la sociedad y directamente las industrias ha ocasionado que se tenga cada vez entornos más dinámicos y complejos. Por este motivo las industrias deben estar preparadas para asumir los nuevos retos y los desafíos que se van presentando, por lo que una mejor comprensión de la dinámica y estados de los procesos permitirá mejorar la toma de decisiones y el desempeño de estos.

De la literatura revisada se observa que los resultados obtenidos en la implementación de Digital Twin en procesos industriales son bastante prometedores y muestran los beneficios de utilizar esta herramienta en conjunto con otras tecnologías, sin embargo, se evidencia que los sistemas requieren mayor flexibilidad para que el DT se adapte a la dinámica actual que presentan las líneas de producción (sistemas heredados) y así cumplir con los requisitos para que la fabricación inteligente logre uno de los principales objetivos que es la interoperabilidad y compatibilidad entre datos y aplicaciones en todas las capas de la pirámide de automatización. Sin embargo, se debe considerar que tradicionalmente, los sistemas industriales han estado centrados en trabajar con hardware y software, caracterizados por soluciones aisladas, que vienen

especificadas por el proveedor y aplicaciones diseñadas específicamente para ese propósito, por estos motivos para la implementación en estos sistemas se debe considerar la dependencia del proveedor, interoperabilidad, flexibilidad y costos de desarrollo. Si bien es cierto que la innovación y adaptación en las industrias manufactureras es algo imperativo que se debe dar, se debe considerar que, para la introducción o adaptación de nuevas tecnologías se debe realizar un análisis exhaustivo del hardware, software, protocolos, interfaces, y mecanismos de integración con los que se cuenta.

También, la combinación de Digital Twin y entornos inmersivos ha mostrado un gran potencial para integrar y potenciar capacidades novedosas en la nueva generación de CPS, proporcionando un enfoque más interactivo e inmersivo para la monitorización, control, simulación y mejora de la eficiencia de procesos industriales. Los CPS son una tecnología cibernética que implica la integración de cálculos e interacción dentro del mundo físico, que tiene la capacidad de controlar la coordinación compleja de múltiples sistemas y realizar una interacción sincrónica o asincrónica con el mundo físico. Por lo cual, al integrar estas tecnologías se ampliarán los beneficios tanto en las entidades físicas y virtuales creando ambientes más reales y controlados. Sin embargo, al ser una tecnología que se encuentra en desarrollo aun presenta limitaciones en la precisión actual y el rendimiento en tiempo real, por el alto consumo de recursos que se presenta al usar entornos inmersivos, por lo que es necesario continuar las investigaciones para integrar el DT a las nuevas TIC, como las redes 5G, Fog, Edge y osmotic computing, para mediante estas tecnologías elevar sus características. Además, la virtualización en la tecnología operativa facilita la abstracción de entidades físicas en contrapartes digitales, permitiendo una interoperabilidad, comunicación estandarizada, flexibilidad y la integración de dispositivos, incluso cuando pueden no estar inherentemente preparados para las TICs.

Para cumplir con los requerimientos de tiempo real en el DT inmersivo, se propuso el uso de IIoT y protocolos de comunicación industriales, donde la arquitectura propuesta se aplicó a una línea de fabricación 4.0 y también se evaluó la recopilación de datos. Los resultados mostraron que el módulo de conexión del DT de todos los elementos puede mejorar significativamente la recopilación de datos, aumentando el rendimiento en tiempo real del DT inmersivo.

Se puede mejorar las capacidades del DT inmersivo mediante co-simulación para añadir servicios semánticos adicionales y a su vez tener una mayor reutilización de los componentes digitales e incrementar las jerarquías al momento de realizar

la simulación. Sin embargo, se debe considerar que al brindar estas capacidades al DT inmersivo se agrega sobrecarga para el cálculo de configuraciones, lo cual incrementa los desafíos en cuanto a los tiempos de respuesta. Por estos motivos es importante dar una jerarquía interna el momento de implementar la arquitectura en función de los datos y procesos.

Por otro lado, se tiene que los DT cognitivos en conjunto con los entornos inmersivos como AR, VR y MR pueden permitir avances significativos en la I4.0, debido a sus capacidades de cognición y facilidad de control, visualización e interacción entre las entidades físicas, virtuales y usuarios, permitiendo así una experiencia necesaria para el futuro de la fabricación.

El desarrollo del DT muestra un papel importante para la transformación de la industria gracias a sus beneficios y características antes mencionadas. Además, se puede aplicar en una amplia variedad de contextos y sirve para cumplir diferentes objetivos en todos los niveles del proceso como: (1) nivel de instalación: mediante la creación previa de replicas virtuales de la línea completa de producción e infraestructura, (2) nivel de planta: realizar el proceso y gestión de toda la cadena de producción, y (3) nivel de producto: mediante la creación de productos, simulación dinámica y evaluación bajo condiciones personalizadas de producto, gracias a las características que presenta a nivel de: realidad, adaptabilidad, integración, dinamismo y visibilidad.

El desarrollo tecnológico y la adopción de la I4.0 y sus tecnologías habilitadoras, abarcará gran parte de la economía global haciéndose presente en todos los ámbitos de la sociedad, pero los mayores cambios se producen en el sector industrial, donde afectan a los procesos como al personal en términos que deben tener conocimiento y el desarrollo de determinadas habilidades, por lo tanto, es importante el aprendizaje de competencias adecuadas a los requisitos actuales y tecnologías habilitadoras. El desarrollo de competencias permitirá a los profesionales de la ingeniería ser altamente competitivos en el mercado laboral, por lo que debe ser uno de los objetivos a trabajar en la academia, la inclusión de nuevos contenidos en función de las nuevas herramientas y tecnologías que se van presentado y así conseguir una formación de especialistas basado en competencias actuales.

Se debe considerar que las industrias tradicionales aun se encuentran en proceso de migración a la tecnología 4.0 y esto genera un paradigma debido a que los beneficios están claros, sin embargo, los costos de la tecnología son un factor

relevante al momento de considerar estas opciones. Por otro lado, al hablar de DT se tiene que la complejidad para la implementación surge en parte de la necesidad de combinar diferentes tecnologías y protocolos que permitan la conexión entre dispositivos que cumplen diferentes funciones en los procesos al tener que cumplir con una integración vertical y horizontal donde implica considerar el almacenamiento y procesamiento de gran cantidad de datos lo cual implica principalmente el manejo de tiempos de respuesta rápidos y seguridad para la información, lo cual complica aún más la difícil tarea de la integración tecnológica.

Además, se debe considerar que la digitalización en las empresas genera una oportunidad para el crecimiento y transformación por los beneficios antes descritos, sin embargo, el cambio va acompañado de la necesidad de cambios estructurales y desafíos potenciales principalmente en los altos costos, falta de conocimientos técnicos y la resistencia al cambio. Por lo que es importante mencionar que esta investigación y la arquitectura propuesta puede ser implementada en cualquier proceso e industria, ya sea para pequeñas o medianas empresas y de esta manera puedan aprovechar plenamente los beneficios de las tecnologías y mejorar su competitividad y sostenibilidad.

#### **4.1. Descripción integrada de la solución**

Luego de realizar diferentes propuestas e investigaciones para la implementación y diseño de arquitecturas para DT inmersivos se debe considerar varios factores que dependen principalmente de cada escenario, tecnología y necesidades que presentan las industrias. Sin embargo, se destaca las siguientes características que deben ser consideradas para el diseño e implementación de arquitecturas de DT inmersivos bajo la norma ISO 23247 y sus capas de aplicación en la industria:

(1) Capa física, con capacidad de integrar equipos heredados y equipos de nueva generación utilizando plataformas que permitan una integración horizontal y vertical del sistema.

(2) Capa virtual, donde se realiza la selección de los atributos observables de los elementos de fabricación, es decir los elementos y características que deben modelarse en todas las líneas de producción físicas en todas sus etapas.

(3) Capa de comunicación, donde se establecen los protocolos de comunicación bidireccionales que sean robustos y flexibles, y permitan la recopilación de los cambios de estado de los elementos de fabricación observables entre las entidades físicas y virtuales.

(4) Capa de datos, donde se realiza la adquisición y procesamiento de datos, para el modelado y actualización del Digital Twin.

(5) Capa de usuario, donde se realiza la optimización y toma de decisiones mediante la integración de tecnologías para mejorar los procesos y potenciar las funcionalidades del DT brindando mayores prestaciones.

Al crear un marco estandarizado, se convierte en un recurso útil para la academia y para la industria que buscan implementar soluciones de DT en una variedad de situaciones y en cualquier parte de la línea de producción. Además, al basarse en una norma se incrementa las posibilidades para un rápido desarrollo y adopción de las nuevas tecnologías.

## **4.2. Análisis de resultados**

El análisis se enfocará en los resultados obtenidos en las publicaciones (1), (2) y (3) donde se realiza una descripción general común de las propuestas. Con el objetivo de analizar: los tiempos de respuesta, supervisión, optimización y toma de decisiones en las arquitecturas implementadas tanto en los sistemas modulares industriales convencionales y en el sistema MES del laboratorio de industria 4.0. Además, se describirá los beneficios y desafíos que presenta la integración y uso de esta tecnología en cada sistema.

Los resultados experimentales de las arquitectura propuesta muestran que la combinación del DT con tecnologías inmersivas permite una mayor interacción del operador con el proceso y brinda nuevas alternativas para la configuración, monitoreo y toma de decisiones en la línea de producción, además el sistema permite la interoperabilidad entre diferentes subsistemas de control, mejorando la gestión y el análisis de los procesos mediante los dispositivos del sistema de fabricación aumentando las características tanto a nivel de campo, proceso y gestión. Donde se tiene una representación virtual en tiempo real con capacidades de simulación e interacción entre las entidades, permitiendo la detección y el diagnóstico de fallas durante la ejecución del proceso debido a que en la industria uno de los problemas presentados son las perturbaciones internas o externas que puede tener la línea de producción lo cual puede generar tiempos de inactividad.

Además, tiene la capacidad de modelar y simular posibles escenarios con datos reales de la línea de producción permitiendo una reducción de los tiempos de inactividad y mejorar la toma de decisiones al conocer mejor el proceso. También se evidencio que el DT se adapta a los sistemas de producción existentes para crear

datos digitales compatibles con el sistema convencional de esta manera se pueden vincular a estos sistemas y tener un monitoreo del proceso con mayor eficiencia y optimización lo que significa una integración total de sistemas digitales y físicos.

La recolección de datos se realiza mediante IIoT, donde los resultados muestran que se puede tener la interconexión de diferentes dispositivos como; sensores, RFID, computadoras y actuadores, mediante el uso de protocolos de comunicación como OPC UA y MQTT y análisis de datos en tiempo real. Esta integración de tecnologías y protocolos permite una automatización avanzada mejorando el monitoreo continuo, optimización y control de los procesos. Además, al tener comunicación con la nube se recopila automáticamente los datos de fabricación y se realiza el almacenamiento y procesamiento, para posteriormente el Digital Twin pueda estimar y analizar los cambios dinámicos dentro del objeto físico en función de los datos recibidos.

La norma ISO 23247 proporciona un marco arquitectónico para la implementación del Digital Twin que no prescribe formatos, tecnologías y protocolos específicos, lo que permite el uso de varios tipos de tecnologías inmersivas y sistemas integrados, protocolos de comunicación abiertos como MQTT, OPC UA, MODBUS y la inclusión de la norma ISO 16792 en conjunto con ISO 23247 para el diseño del DT lo que permitió una mejora en el diseño y renderización del modelo 3D con mayor detalle. Esta unión de recursos y plataformas permitió una implementación exitosa, y su validación se realizó en un laboratorio modular con componentes industriales y tecnología 4.0. Además, al utilizar OPC-UA se tiene una comunicación e interoperabilidad fluidas en sistemas de control distribuidos, consiguiendo una interfaz independiente de la plataforma que facilita el intercambio y la integración de datos.

En cuanto al análisis de los tiempos de transmisión, se observó que al utilizar el protocolo MQTT para la comunicación del sistema embebido con la nube, se observa que la latencia está directamente relacionada con los siguientes factores: cantidad de datos, el ancho de banda y la carga que presente la red en ese momento. Los resultados mostraron que los tiempos de transmisión entre las entidades físicas y virtuales aumentan considerablemente en función de la cantidad de datos enviados por los sensores, esto se debe a que al realizar el DT inmersivo tiene un mayor consumo de recursos y MQTT es un protocolo eficiente para mensajes pequeños. Por otro lado, se evidencia que si se envía del proceso solo las principales variables de visualización y control para el DT mediante MQTT se tiene el beneficio que el paquete de datos es de menor tamaño que otros protocolos, lo que da como

resultado una velocidad cada vez mayor de transmisión de datos, y además proporciona un nivel de calidad de servicio que brinda confiabilidad en el envío de información. Se evidencio que para la comunicación con la nube el protocolo MQTT realiza la comunicación de manera directa sin la necesidad de la confirmación, por lo cual acelera la integración de nuevos dispositivos.

En la siguiente etapa de la investigación se utilizó el protocolo OPC UA para la comunicación entre las entidades físicas y virtuales, debido a flexibilidad y a que permite realizar una comunicación e integración horizontal y vertical entre subsistemas en diferentes niveles de la pirámide de automatización y esta es una característica que puede ser utilizada para obtener los datos en los niveles de gestión, proceso y campo y posteriormente sean enviados al DT. Dentro de los protocolos utilizados para la comunicación entre los diferentes niveles y plataformas se debe considerar principalmente la robustez y bidireccionalidad, además, se debe considerar que la elección de un protocolo también depende de las características de los equipos físicos disponibles.

Para la presente investigación fue beneficioso utilizar el estándar OPC UA, que garantiza la compatibilidad y variabilidad además, tiene interfaces y comunicación fluidas en procesos de la I4.0, con soporte para la comunicación en todos los niveles de la pirámide de automatización, permitiendo que los dispositivos puedan entregar los datos directamente a niveles superiores y la comunicación entre diferentes dispositivos, por estas razones se puede realizar el mapeo de todo el conjunto de información generada por el Digital Twin, incluyendo todos los aspectos semánticos para permitir un intercambio de datos interoperable entre las entidades físicas y virtuales, toda la información puede ser publicada por el servidor, lo que permite un intercambio de datos interoperable con una gran cantidad de aplicaciones y tecnologías integradas. OPC UA permitió la adquisición e intercambio de datos entre dispositivos de bajo coste, como sensores y actuadores, y el sistema de control, permitiendo en el Digital Twin el monitoreo, análisis y control en tiempo real mejorando su rendimiento y confiabilidad. Se debe mencionar que las comunicaciones industriales como Modbus TCP u OPC UA permiten una comunicación sencilla, segura y confiable entre los entornos inmersivos y los sistemas industriales.

Node-RED es una plataforma que permitió la integración y gestión bidireccional de datos del proceso y puede ser utilizado con los protocolos MQTT para enviar o recibir datos a la nube y OPC UA para enviar o recibir datos de los sensores, lo cual abre las brechas para la integración entre sistemas en un entorno DT, esta

herramienta se destaca por su amplia adopción y uso en diversos dominios de aplicación debido a sus características facilita la orquestación, interoperabilidad, escalabilidad y modularidad, y estos son requisitos fundamentales que debe cumplir un DT. Para mejorar la seguridad se puede configurar certificados SSL/TLS y si se utiliza brokers se puede proteger mediante autenticación. Finalmente es importante elegir un sistema de almacenamiento de datos que pueda gestionar y dar seguridad a la gran cantidad de datos generados por el proceso y el DT.

El uso de IoT permite la interconexión de dispositivos entre las distintas etapas de los procesos de fabricación, para la obtención de la información necesaria para crear el puente entre los entornos físico y virtual. Estos datos son recopilados de manera continua y pueden ser utilizados para proporcionar una representación exacta del sistema físico y procesar los modelos de simulación para la toma de decisiones. Esta combinación de tecnologías permite una mejora en la reducción de costos, aumento de flexibilidad y escalabilidad del DT, brindando así la opción de tener un camino abierto para seguir implementando esta tecnología en los procesos, en función de las nuevas necesidades que se van presentando con el avance tecnológico y requerimientos de la sociedad. Además, al tener los datos en la nube facilita la integración con otras tecnologías como son los entornos inmersivos o también permite el uso de diferentes protocolos según el nivel de la pirámide de automatización y dispositivos utilizados.

Algunos factores limitantes que se revelaron durante el análisis de resultados del estudio fue el alto consumo de recursos computacionales y la latencia presentada en la conexión de la nube, que depende directamente de la calidad de internet y cantidad de datos que deben ser enviados a la nube para desarrollar las aplicaciones inmersivas, además, se debe considerar que al incluir ambientes inmersivos el tiempo aumenta considerablemente por el procesamiento y renderización que ejecuta el entorno virtual dependiendo de la cantidad de variables utilizadas. Para solventar este problema se sugiere seleccionar los parámetros que van a ser enviados para el monitoreo y control desde los entornos inmersivos en función de las necesidades que tiene cada proceso y de esta manera reducir los tiempos para la interacción desde los entornos físico y virtuales. Además, para la implementación se debe disponer de dispositivos con alto rendimiento para lograr una sincronización integral durante el monitoreo de las entidades procesadas y evitar que el tiempo de comunicación afecte al proceso y a la toma de decisiones del operador.

Se evidencio que el uso de AR, VR y Senso Glove permite una mayor inmersión, interactividad e interacción entre humanos y máquinas, potenciando las capacidades del DT y ampliando sus beneficios en las industrias. Esto se debe a la constante transferencia de datos, replicación de procesos digitales, confiabilidad, diagnóstico y análisis que ofrecen. Además, el uso de estas tecnologías proporciona una experiencia colaborativa más inmersiva para el usuario, mejorando la interacción y comprensión de los procesos mediante los entornos digitales. Comprender el estado de los sistemas físicos mediante la visualización y el análisis de datos recopilados puede ayudar a predecir y evaluar los cambios dinámicos, recomendar acciones apropiadas mientras las entidades físicas responden a los cambios para optimizar y mejorar los procesos de operación y cooperación en la fabricación. La unión de DT con tecnologías inmersivas mostró una alta sinergia en la solución propuesta en entornos reales donde se logró una interacción entre las entidades físicas y virtuales en tiempo real, una representación visual interactiva y amigable con los operarios y una colaboración más fácil e intuitiva entre el humano y máquina, sin embargo, se debe considerar que para mejorar la renderización y tener una mejora en la visualización de objetos en el entorno virtual se requiere un alto consumo de recursos computacionales lo cual debe ser abordado para tener una sincronización entre los entornos físicos y virtuales.

La implementación del DT en la industria 4.0 de manera general presenta aun varios desafíos que deben ser abordados entre los principales se tiene: (1) la complejidad y distribución que tienen las redes que comunican los niveles de gestión, por la integración de tecnologías y seguridad que deben tener los datos, (2) problema del rendimiento que tiene la simulación del DT inmersivo, por el alto consumo de recursos computacionales que estos presentan, (3) interoperabilidad e integración de sistemas y datos entre diferentes plataformas, y (4) demandas de fidelidad y tiempos de respuesta rápidos.

Es importante mencionar que dentro de los desafíos encontrados en la arquitectura propuesta se tiene el uso de herramientas basadas en la nube, lo cual implica un aumento de latencia y tiempos muertos que pueden ser inaceptables en algunos entornos industriales específicos, por lo que es importante analizar en que etapa de la línea de producción se pueden aplicar el DT inmersivo y considerar las limitaciones que presentan las redes actuales en términos de velocidad y latencia, debido a que podrían provocar un mal rendimiento del sistema y por ende, una mala experiencia inmersiva para los usuarios.

La arquitectura propuesta introduce avances en la digitalización industrial, sin embargo, también presenta varios puntos que aún deben ser trabajados para tener un mejor desempeño debido a las características distribuida que presenta el DT inmersivo principalmente en la latencia, sincronización de los entornos físicos y virtuales y la seguridad de los datos donde se debe tener una mayor investigación. Además, la integración de nuevas tecnologías para los sistemas inmersivos y comunicación en conjunto con el uso de hardware y protocolos heredados pueden presentar desafíos que deben ser analizados antes del diseño de los sistemas para asegurar una interoperabilidad e integración de los nuevos sistemas con la infraestructura existente.

### **4.3. Conclusiones**

El Digital Twin inmersivo representa un paradigma tecnológico novedoso que introduce enfoques innovadores para mejorar los procesos de monitoreo, control, optimización, toma de decisiones y gestión eficiente durante todo el ciclo de vida de los productos. Estas características pueden mejorar la precisión y eficiencia de la fabricación basándose en simulación de alta fidelidad en tiempo real, convirtiendo toda la información disponible en conocimiento y cerrando el ciclo del sistema ciberfísico por lo que son una función vital para lograr la fabricación inteligente.

Mediante la simulación de alta fidelidad y los entornos de AR y VR que proporciona el DT se tiene entornos más realistas que generan una experiencia inmersiva e interactiva para el operador y los clientes, aumentando la comprensión de los sistemas y por ende permite tener una mayor precisión para la toma de decisiones, mejorando la planificación, precisión y eficiencia de la fabricación mediante un análisis más detallado del proceso en diferentes etapas del ciclo de vida del producto, brindando ventajas como la creación interactiva para productos personalizados e innovación continua. Además, estos sistemas pueden ser utilizados para el entrenamiento y formación de operarios en la industria y estudiantes en la academia.

Los resultados experimentales de la arquitectura propuesta del DT con el sistema MES muestra que el sistema permite la interoperabilidad entre diferentes subsistemas de control, mejorando el control, supervisión, gestión y el análisis de los procesos mediante los dispositivos del sistema de fabricación. La comunicación de las entidades físicas y virtuales en todos los niveles del sistema MES (gestión, proceso y campo) se realizó mediante OPC UA, que es un protocolo flexible y robusto, y permite realizar una integración horizontal y vertical entre subsistemas

en diferentes niveles de la pirámide de automatización y además garantiza la compatibilidad y variabilidad permitiendo la comunicación entre diferentes dispositivos lo cual le hace un protocolo óptimo para ser utilizado en la implementación de Digital Twin. OPC UA tiene su punto fuerte en el modelado semántico de información y proporciona un protocolo de comunicación multiplataforma, mientras que MQTT se centra en ser un protocolo ligero de publicación/suscripción que trabaja de manera eficiente para mensajes pequeños y tiene poco consumo de energía lo cual lo hace adecuado para aplicaciones de IoT.

La norma ISO 23247 proporciona un marco arquitectónico para la implementación de Digital Twin en la industria que no prescribe formatos, tecnologías y protocolos específicos, lo que permite el uso de varios tipos de tecnologías inmersivas y sistemas integrados; de los resultados obtenidos en las arquitecturas propuestas se puede destacar que para la etapa de comunicación los protocolos que se obtuvieron mejores resultados fueron MQTT cuando se trabaja con sistemas de bajo costo “sistemas embebidos” y OPC UA para dispositivos industriales “PLCs”, mientras que para el diseño de entorno digital, la inclusión de la norma ISO 16792 en conjunto con la ISO 23247 permitió mejorar el modelo 3D y tener requisitos mínimos para su diseño, y finalmente en la capa de usuario donde se puede incluir recursos y plataformas se evidencio que se puede integrar tecnologías habilitadoras para la I4.0 entre ellas el uso de tecnologías AR y VR para el control y supervisión.

En la arquitectura propuesta se observó que el DT en conjunto con el uso de protocolos industriales permiten el intercambio de información tanto de modelos como de direcciones físicas y virtuales integrando el contexto real de los equipos de medición y el análisis de datos simulados, logrando una mejora en la eficiencia operativa y optimización de los procedimientos de operación de fabricación a través del monitoreo continuo, la interoperabilidad y la reducción de tiempo en la detección y diagnóstico de errores durante toda la línea de producción, lo cual genera que estos errores pueden ser identificados más rápido que en el sistema convencional reduciendo considerablemente los tiempos de producción, esto se logra mediante la sincronización de los entornos físicos y virtuales.

#### **4.4. Futuras líneas de investigación**

El Digital Twin permite una representación de las aplicaciones de I4.0 abriendo nuevas vías de investigación como: simulación, análisis virtual, plataforma multiservicio, mantenimiento predictivo, aprendizaje profundo. Por lo cual, es una tecnología esencial para el desarrollo de la industria y transformación digital, por

lo que se plantea como trabajo futuro, investigar la mejora de los DT inmersivos especialmente en términos de seguridad y latencia, ya que los datos manejados son cruciales para la gestión y proceso, donde una posible solución para mejorar estos parámetros podría ser la implementación del DT inmersivo en conjunto con computación en el borde, osmótica o niebla. Al usar estas tecnologías se puede ampliar los beneficios del DT y superar algunos de los desafíos que se presentan en la arquitectura actual, teniendo ventajas como: realizar un procesamiento cerca de la fuente donde se generan los datos, descentralización de procesos, sistemas más escalables, optimización dinámica de recursos, adaptabilidad de acuerdo con las condiciones cambiantes de los sistemas, baja latencia y aumento en la seguridad.

También se plantea como trabajo futuro migrar la arquitectura propuesta de la presente investigación de Digital Twin a un Digital Clone. Se menciona que un Digital Clone podría ser el sucesor del Digital Twin con la diferencia que entre sus tecnologías habilitadoras debería incluir la inteligencia artificial y la cognición como parte fundamental y se espera que en el futuro se puedan generar automáticamente nuevas soluciones en la mejora de la calidad, innovación, optimización, diseño y toma de decisiones automática en la industria. Sin embargo, se debe considerar que es una herramienta que debe tener privacidad, exactitud y seguridad en los datos, por la gran cantidad de información que trabaja para la toma automática de decisiones y la efectividad depende directamente de la calidad y cantidad de datos que contenga, por lo que se requiere una gestión cuidadosa de sus datos y recursos.

Otra de las líneas que surgió de esta investigación es la implementación de los Digital Twin en el metaverso, donde la unión de estas tecnologías puede aumentar las capacidades de simulación e inmersión que tiene el metaverso y brindar beneficios como: ahorro de recursos, mayor eficiencia, acceso global, flexibilidad, seguridad, entre otros, por las características antes mencionadas esta convergencia puede aportar significativamente a una nueva revolución de la industria, sin embargo, hay que considerar que el uso de estas tecnologías involucraría un cambio cultural y social, además, de presentarse desafíos en la adopción, seguridad, capacitación y costo inicial de la implementación.

## Referencias

- [1] S. Cavalieri and S. Gambadoro, “Proposal of Mapping Digital Twins Definition Language to Open Platform Communications Unified Architecture,” *Sensors*, vol. 23, no. 4, 2023, doi: 10.3390/s23042349.
- [2] J. Vyskočil, P. Douda, P. Novák, and B. Wally, “A Digital Twin-Based Distributed Manufacturing Execution System for Industry 4.0 with AI-Powered On-The-Fly Replanning Capabilities,” *Sustain.*, vol. 15, no. 7, pp. 1–27, 2023, doi: 10.3390/su15076251.
- [3] Y. Son, G. Kim, H. Kim, C. Jun, and S. Noh, “Past, present, and future research of digital twin for smart manufacturing,” *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–23, 2022, doi: 10.1093/jcde/qwab067.
- [4] D. Pereira, J. Uribetxebarria, and U. Leturiondo, “Evolution of Digital Twin solutions in the manufacturing industry,” *IEEE*, 2023, doi: 10.1109/SWC57546.2023.10449254.
- [5] A. Mubarak, M. Asmelash, A. Azhari, T. Alemu, F. Mulubrhan, and K. Saptaji, “Digital Twin Enabled Industry 4.0 Predictive Maintenance Under Reliability-Centred Strategy,” *2022 1st Int. Conf. Electr. Electron. Inf. Commun. Technol. ICEEICT 2022*, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/ICEEICT53079.2022.9768590.
- [6] E. Negri, S. Berardi, L. Fumagalli, and M. Macchi, “MES-integrated digital twin frameworks,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 56, no. May, pp. 58–71, 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.05.007.
- [7] A. Khafaga, L. C. Moreira, and B. Horan, “Towards Industry 5.0: Augmented Reality Assistance Systems for People-Centred Digitalisation and Smart Manufacturing,” *ICAC 2023 - 28th Int. Conf. Autom. Comput.*, pp. 1–7, 2023, doi: 10.1109/ICAC57885.2023.10275290.
- [8] S. Liu, P. Zheng, and J. Bao, “Digital Twin-based manufacturing system: a survey based on a novel reference model,” *J. Intell. Manuf.*, 2023, doi: 10.1007/s10845-023-02172-7.
- [9] C. Zhang, G. Zhou, D. Ma, Z. Wang, and Y. Zou, “Digital twin-driven multi-dimensional assembly error modeling and control for complex assembly process in Industry 4.0,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 60, no. September 2023, p. 102390, 2024, doi: 10.1016/j.aei.2024.102390.
- [10] ISO TC 184/SC 4, “Automation systems and integration-Digital twin framework for manufacturing-Part 1: Overview and general principles,” vol. 2021, 2021, [Online]. Available: [www.iso.org](http://www.iso.org)
- [11] G. Bechu, A. Beugnard, C. G. L. Cao, Q. Perez, C. Urtado, and S. Vauttier,

- “A software engineering point of view on digital twin architecture,” *IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. ETFA*, vol. 2022-Septe, 2022, doi: 10.1109/ETFA52439.2022.9921617.
- [12] D. Calandra, F. G. Prattico, J. Fiorenza, and F. Lamberti, “Exploring the suitability of a Digital twin- and eXtended Reality-based telepresence platform for a collaborative robotics training scenario over next-generation mobile networks,” *EUROCON 2023 - 20th Int. Conf. Smart Technol. Proc.*, pp. 701–706, 2023, doi: 10.1109/EUROCON56442.2023.10198883.
- [13] J. Song *et al.*, “Augmented Reality-Based BIM Data Compatibility Verification Method for FAB Digital Twin implementation,” *Buildings*, vol. 13, no. 11, 2023, doi: 10.3390/buildings13112683.
- [14] M. Pajpach, R. Pribiš, P. Drahoš, E. Kučera, and O. Haffner, “Design of an Educational-development Platform for Digital Twins using the Interoperability of the OPC UA Standard and Industry 4.0 Components,” *Int. Conf. Electr. Comput. Commun. Mechatronics Eng. ICECCME 2023*, no. July, pp. 19–21, 2023, doi: 10.1109/ICECCME57830.2023.10252941.
- [15] C. Assawaarakul, W. Srisawat, S. D. N. Ayuthaya, and S. Wattanasirichaigoon, “Integrate Digital Twin to Exist Production System for Industry 4.0,” *TIMES-iCON 2019 - 2019 4th Technol. Innov. Manag. Eng. Sci. Int. Conf.*, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/TIMES-iCON47539.2019.9024430.
- [16] R. P. Rolle, V. D. O. Martucci, and E. P. Godoy, “Architecture for Digital Twin implementation focusing on Industry 4.0,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, no. 5, pp. 889–898, 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9082917.
- [17] Q. Min, Y. Lu, Z. Liu, C. Su, and B. Wang, “Machine Learning based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry,” *Int. J. Inf. Manage.*, vol. 49, no. October 2018, pp. 502–519, 2019, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2019.05.020.
- [18] C. Zhang, G. Zhou, J. Hu, and J. Li, “Deep learning-enabled intelligent process planning for digital twin manufacturing cell,” *Knowledge-Based Syst.*, vol. 191, p. 105247, 2020, doi: 10.1016/j.knosys.2019.105247.
- [19] L. Pérez, S. Rodríguez-Jiménez, N. Rodríguez, R. Usamentiaga, and D. F. García, “Digital twin and virtual reality based methodology for multi-robot manufacturing cell commissioning,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 10, 2020, doi: 10.3390/app10103633.
- [20] S. M. Jeon and S. Schuesslbauer, “Digital twin application for production optimization,” *IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag.*, vol. 2020-Decem, pp. 542–545, 2020, doi: 10.1109/IEEM45057.2020.9309874.
- [21] D. Da Silva Ribeiro Castro, A. M. A. De Sales, N. J. Da Silva Farias, R. L. P. De Medeiros, V. J. Da Silva, and V. F. De Lucena Junior, “Monitoring and Controlling Industrial Cyber-Physical Systems with Digital Twin and Augmented Reality,” *Dig. Tech. Pap. - IEEE Int. Conf. Consum. Electron.*, vol. 2023-Janua, pp. 1–4, 2023, doi: 10.1109/ICCE56470.2023.10043445.
- [22] A. Abdelsattar, E. J. Park, and A. Marzouk, “An OPC UA Client/Gateway-

- Based Digital Twin Architecture of a SCADA System with Embedded System Connections,” *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM*, vol. 2022-July, pp. 798–803, 2022, doi: 10.1109/AIM52237.2022.9863367.
- [23] R. González-Herbón, G. González-Mateos, J. R. Rodríguez-Ossorio, M. Domínguez, S. Alonso, and J. J. Fuertes, “An Approach to Develop Digital Twins in Industry,” *Sensors*, vol. 24, no. 3, 2024, doi: 10.3390/s24030998.
- [24] Y. Cohen, M. Faccio, F. Pilati, and X. Yao, “Design and management of digital manufacturing and assembly systems in the Industry 4.0 era,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 105, no. 9, pp. 3565–3577, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04595-0.
- [25] D. Firmani, F. Leotta, F. Mandreoli, and M. Mecella, “Big Data Management in Industry 4.0,” *Proc. - 2019 IEEE Int. Conf. Web Serv. ICWS 2019 - Part 2019 IEEE World Congr. Serv.*, vol. 4, no. November, pp. 229–236, 2019, doi: 10.1109/ICWS.2019.00047.
- [26] C. Seródio, P. Mestre, J. Cabral, M. Gomes, and F. Branco, “Software and Architecture Orchestration for Process Control in Industry 4.0 Enabled by Cyber-Physical Systems Technologies,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 5, p. 2160, 2024, doi: 10.3390/app14052160.
- [27] D. Almeida and A. C. Simões, “Industry 4.0 technologies’ adoption by industrial companies - a literature review on the impacts in sustainability dimensions,” *Proc. 29th Int. Conf. Eng. Technol. Innov. Shap. Futur. ICE 2023*, 2023, doi: 10.1109/ICE/ITMC58018.2023.10332349.
- [28] A. Kukharuk and J. Gavrysh, “Competitiveness of SMEs in Terms of Industry 4.0 Anna,” *2019 Int. Conf. Creat. Bus. Smart Sustain. Growth*, p. 2, 2019.
- [29] P. Zahariev *et al.*, “Industry 4.0 and Beyond—Present Trends, Emerging Solutions and Future Technologies in the Area of the Industrial Automation,” *2024 Jt. Int. Conf. Digit. Arts, Media Technol. with ECTI North. Sect. Conf. Electr. Electron. Comput. Telecommun. Eng. (ECTI DAMT & NCON)*, pp. 525–528, 2024, doi: 10.1109/ectidamtcon60518.2024.10479988.
- [30] S. Profanter, A. Tekat, K. Dorofeev, M. Rickert, and A. Knoll, “OPC UA versus ROS, DDS, and MQTT: Performance evaluation of industry 4.0 protocols,” *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, vol. 2019-Febru, pp. 955–962, 2019, doi: 10.1109/ICIT.2019.8755050.
- [31] S. Bustos-Pulluquitin, G. Caiza, M. Llumitasig-Galarza, M. Castro-Mayorga, C. Sánchez-Benítez, and M. V. Garcia, “Constrained Dynamic Matrix Control under International Electrotechnical Commission Standard 61499 and the Open Platform Communications Unified Architecture,” *Sensors*, vol. 23, no. 15, 2023, doi: 10.3390/s23156919.
- [32] Y. Li, J. Jiang, C. Lee, and S. H. Hong, “Practical Implementation of an OPC UA TSN Communication Architecture for a Manufacturing System,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 200100–200111, 2020, doi:

- 10.1109/ACCESS.2020.3035548.
- [33] M. Ladegourdie and J. Kua, "Performance Analysis of OPC UA for Industrial Interoperability towards Industry 4.0," *Internet of Things*, vol. 3, no. 4, pp. 507–525, 2022, doi: 10.3390/iot3040027.
- [34] S. Hasan, K. Lee, D. Moon, S. Kwon, S. Jinwoo, and S. Lee, "Augmented reality and digital twin system for interaction with construction machinery," *J. Asian Archit. Build. Eng.*, vol. 21, no. 2, pp. 564–574, 2022, doi: 10.1080/13467581.2020.1869557.
- [35] N. Jeffrey, Q. Tan, and J. R. Villar, "Using Ensemble Learning for Anomaly Detection in Cyber-Physical Systems," *Electron.*, vol. 13, no. 7, pp. 1–17, 2024, doi: 10.3390/electronics13071391.
- [36] X. Yuan, H. Cao, Z. Chen, J. Xu, and H. Liu, "Control Strategy for Building Air Conditioning Cluster Loads Participating in Demand Response Based on Cyber-Physical System," *Energies*, vol. 17, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/en17061291>.
- [37] R. Bonafiglia, G. Castellano, I. Cerrato, and F. Risso, "End-to-end service orchestration across SDN and cloud computing domains," *2017 IEEE Conf. Netw. Softwarization Softwarization Sustain. a Hyper-Connected World en Route to 5G, NetSoft 2017*, 2017, doi: 10.1109/NETSOFT.2017.8004234.
- [38] L. Liu, X. Wu, S. Li, Y. Li, S. Tan, and Y. Bai, "Solving the class imbalance problem using ensemble algorithm: application of screening for aortic dissection," *BMC Med. Inform. Decis. Mak.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–16, 2022, doi: 10.1186/s12911-022-01821-w.
- [39] J. Xing, D. Wang, L. Zhang, and L. Li, "Cyber-Physical System Converged Digital Twin for Secure Patient Monitoring and Attack Detection," *Wirel. Pers. Commun.*, 2024, doi: 10.1007/s11277-024-11201-4.
- [40] A. Aziz, S. S. Chouhan, O. Schelen, and U. Bodin, "Distributed Digital Twins as Proxies-Unlocking Composability and Flexibility for Purpose-Oriented Digital Twins," *IEEE Access*, vol. 11, no. December, pp. 137577–137593, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3340132.
- [41] C. Luo *et al.*, "DT-Driven Computation Offloading for Edge Computing in IIoT with RIS-assisted Multi-UAVs," *IEEE Internet Things J.*, vol. PP, no. c, p. 1, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3510951.
- [42] Y. Kong, Y. Wang, and L. Ren, "A Cloud-Edge Collaborative Security Architecture for Industrial Digital Twin Systems," *Proc. - 2022 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intell. Comput. Auton. Trust. Veh. Scalable Comput. Commun. Digit. Twin, Priv. Comput. Metaverse, SmartWorld/UIC/ATC/ScalCom/DigitalTwin/PriComp/Metaverse 2022*, pp. 2244–2249, 2022, doi: 10.1109/SmartWorld-UIC-ATC-ScalCom-DigitalTwin-PriComp-Metaverse56740.2022.00319.
- [43] J. Song, Y. Kang, Q. Song, L. Guo, and A. Jamalipour, "Distributed Resource Optimization With Blockchain Security for Immersive Digital Twin in IIoT," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 19, no. 5, pp. 7258–7267, 2023, doi:

- 10.1109/TII.2022.3224986.
- [44] M. Pajpach, P. Drahos, R. Pribis, and E. Kucera, “Educational-development Workplace for Digital Twins using the OPC UA and Unity 3D,” *Proc. 31st Int. Conf. Cybern. Informatics, K I 2022*, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/KI55792.2022.9925933.
- [45] B. Djordjević, E. Krmac, C. Y. Lin, O. Fröidh, and B. Kordnejad, “An optimisation-based digital twin for automated operation of rail level crossings,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 239, no. October 2023, 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.122422.
- [46] V. Sharma, K. Sharma, and A. Kumar, “From Theory to Practice: A Systematic Review of Digital Twin Implementations Across Industry 4.0,” *2023 14th Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol. ICCCNT 2023*, pp. 1–7, 2023, doi: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10308052.
- [47] P. Bellavista and G. Di Modica, “IoTwins : Implementing Distributed and Hybrid Digital Twins in Industrial Manufacturing and Facility Management Settings,” 2024.
- [48] B. Leng *et al.*, “Digital twin monitoring and simulation integrated platform for reconfigurable manufacturing systems,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 58, no. May, 2023, doi: 10.1016/j.aei.2023.102141.
- [49] N. Zhang, R. Bahsoon, and G. Theodoropoulos, “Towards Engineering Cognitive Digital Twins with Self-Awareness,” *Conf. Proc. - IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, vol. 2020-Octob, pp. 3891–3896, 2020, doi: 10.1109/SMC42975.2020.9283357.
- [50] T. Mortlock, D. Muthirayan, S. Y. Yu, P. P. Khargonekar, and M. Abdullah Al Faruque, “Graph Learning for Cognitive Digital Twins in Manufacturing Systems,” *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput.*, vol. 10, no. 1, pp. 34–45, 2022, doi: 10.1109/TETC.2021.3132251.
- [51] S. Gil, E. Kamburjan, P. Talasila, and P. G. Larsen, “An architecture for coupled digital twins with semantic lifting,” *Softw. Syst. Model.*, 2024, doi: 10.1007/s10270-024-01221-w.
- [52] A. Nivetha and K. S. Preetha, *A Review on Cyber-Twin in Sixth Generation Wireless Networks: Architecture, Research Challenges & Issues*, vol. 138, no. 3. Springer US, 2024. doi: 10.1007/s11277-024-11577-3.
- [53] L. Zhang, J. Liu, and C. Zhuang, “Digital Twin Modeling Enabled Machine Tool Intelligence: A Review,” *Chinese J. Mech. Eng. (English Ed.)*, vol. 37, no. 1, 2024, doi: 10.1186/s10033-024-01036-2.
- [54] W. Liu, B. Han, A. Zheng, and Z. Zheng, “Fault Diagnosis for Reducers Based on a Digital Twin,” *Sensors*, 2024, doi: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/8/2575>.
- [55] H. Cai and J. Wan, “Digital Twin-Driven Multi-Factor Production Capacity Prediction for Discrete Manufacturing Workshop,” *Appl. Sci.*, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14073119>.

- [56] M. Touhid *et al.*, “Building a cloud-based digital twin for remote monitoring and control of a robotic assembly system,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 129, no. 9–10, pp. 4045–4057, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12611-7.
- [57] P. Strelec, T. Horak, S. Kovac, E. Nemlaha, and P. Tanuska, “IIoT Device Prototype Design Using State Machine According to OPC UA,” *IEEE Access*, vol. 10, no. November, pp. 134004–134017, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3232061.
- [58] G. Boschetti, “Designing Digital Twins of Robots Using Simscape Multibody,” *Robotics*, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/robotics13040062>.
- [59] E. Ferko, A. Bucaioni, P. Pelliccione, and M. Behnam, “Standardisation in Digital Twin Architectures in Manufacturing,” *Proc. - IEEE 20th Int. Conf. Softw. Archit. ICSA 2023*, pp. 70–81, 2023, doi: 10.1109/ICSA56044.2023.00015.
- [60] ISO/IEC/ IEEE 42020, “Software, systems and enterprise — Architecture processes,” vol. 2019, 2019.
- [61] I. 42010:2022(E), “Software, systems and enterprise — Architecture description,” vol. 2022, 2022.
- [62] V. Fernández-Mireles, M. Martínez-Cruz, M. Cardenas-Juarez, Á. Montalvo-Rodríguez, and V. Alemán-Mendiola, “Design and Implementation of an Augmented Reality-based App for Assembly Lines in Industry 4.0,” no. Ropec, pp. 1–6, 2024, doi: 10.1109/ropec58757.2023.10409306.
- [63] D. Joao, P. Lodetti, M. Martins, and J. Almeida, “Virtual and Augmented Reality Applied in Power Electric Utilities for Human Interface Improvement-A Study Case for Best Practices,” *2020 IEEE Technol. Eng. Manag. Conf. TEMSCON 2020*, vol. 7, pp. 0–3, 2020, doi: 10.1109/TEMSCON47658.2020.9140129.
- [64] D. Silion, G. G. Constantinescu, and A. Iftene, “Leveraging Digital Twin Concepts for Future Applications,” *18th Int. Conf. Innov. Intell. Syst. Appl. INISTA 2024*, pp. 1–5, 2024, doi: 10.1109/INISTA62901.2024.10683845.
- [65] G. Caiza and R. Sanz, “Digital Twin to Control and Monitor an Industrial Cyber-Physical Environment Supported by Augmented Reality,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 13, p. 7503, 2023, doi: 10.3390/app13137503.
- [66] G. Caiza and R. Sanz, “Immersive Digital Twin under ISO 23247 Applied to Flexible Manufacturing Processes,” *Appl. Sci.*, vol. 14, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14104204> Academic.
- [67] G. Caiza and R. Sanz, “An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes,” *Appl. Sci.*, vol. 14, pp. 1–20, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14104125>.
- [68] ISO/IEC/IEEE 42030:2019(E), “Software, systems and enterprise — Architecture evaluation framework,” vol. 2019, 2019.
- [69] I. Abdullahi, S. Longo, and M. Samie, “Towards a Distributed Digital Twin

Framework for Predictive Maintenance in Industrial Internet of Things (IIoT),” *Sensors*, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/s24082663>.

- [70] L. Rig, J. Fabianov, M. Lokš, and N. Mikušov, “Utilising Digital Twins to Bolster the Sustainability of Logistics Processes in Industry 4.0,” *Sustainability*, 2024, [Online]. Available: [https://www.mdpi.com/2071-1050/16/6/2575?utm\\_source=researcher\\_app&utm\\_medium=referral&utm\\_campaign=RESR\\_MRKT\\_Researcher\\_inbound](https://www.mdpi.com/2071-1050/16/6/2575?utm_source=researcher_app&utm_medium=referral&utm_campaign=RESR_MRKT_Researcher_inbound)

## **Anexos**

Anexo 1: Publicación (1)

Article

# Digital Twin to Control and Monitor an Industrial Cyber-Physical Environment Supported by Augmented Reality

Gustavo Caiza <sup>1,2,\*</sup> and Ricardo Sanz <sup>1</sup><sup>1</sup> Departamento De Automática, Universidad Politécnica De Madrid, UPM, 28006 Madrid, Spain<sup>2</sup> Departamento De Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana, UPS, Quito 170146, Ecuador

\* Correspondence: gcaiza@ups.edu.ec

**Abstract:** Increasing industrial development and digital transformations have given rise to a technology called Digital Twin (DT) that has the potential to break the barrier between physical and cyberspace. DT is a virtual and dynamic model enabled through a bidirectional data flow that creates high-reliability models with interconnection and fusion between the physical and digital systems for full integration. In smart manufacturing, this technology is increasingly used in research and industry. However, the studies conducted do not provide a definition or a single integrally connected model. To develop the Digital Twin shown in this research, the literature was reviewed to learn about the enabling technologies and architectures used at the industrial level. Then, a methodology was used to obtain the physical process information, create the digital environment, communicate the physical environment, apply simulation models in the digital environment, and parameterize the simulation environment with the physical process in real-time to obtain the digital twin supported with augmented reality. The system was implemented in the MPS-500 modular production station that has industrial sensors and actuators. The virtual environment was designed with Blender and Vuforia to create the augmented reality environment. In the proposed methodology, robust devices (field and control level) and low-cost embedded systems were used for the creation and communication of the virtual environment (monitoring and control); for the joint work of these technologies, they were carried out through the use of the following protocols: Open Platform Communications United Architecture (OPC UA), Ethernet, and machine to machine (M2M), with which a communication was achieved between the different levels of the automation pyramid. The results show that the proposed methodology for the implementation of the DT allows bidirectional communication between the physical and virtual environment and can also be visualized with the support of AR, thus providing its characteristics to the proposed DT. Digital Twin is an essential factor in creating virtual environments and improving applications between the real and digital world, establishing a bidirectional communication through the Ethernet protocol, with a communication time of approximately 100 ms. This technology interacts with the virtual environment and performs mappings, thus achieving timely and dynamic adjustment. This improves data management and production and incorporates process simulation and physical control in real-time, allowing to execute and trigger actions in the physical equipment simultaneously.

**Keywords:** digital twin; IIoT; industry 4.0; augmented/virtual reality; CPS



**Citation:** Caiza, G.; Sanz, R. Digital Twin to Control and Monitor an Industrial Cyber-Physical Environment Supported by Augmented Reality. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 7503. <https://doi.org/10.3390/app13137503>

Academic Editor: Andrea Prati

Received: 24 May 2023

Revised: 9 June 2023

Accepted: 20 June 2023

Published: 25 June 2023



**Copyright:** © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Advances in manufacturing technologies and digital transformation are changing the industrial sector worldwide, implementing new concepts and cutting-edge technologies such as the Internet of Things (IoT), Big Data (BD), Cyber-Physical Systems (CPS), Cloud Computing (CC), and Artificial Intelligence (AI) [1]. These technologies have greatly stimulated the development of smart manufacturing, also called Industry 4.0, where there is greater data management that allows factories to save time, improve productivity, customize products, and respond flexibly to current requirements. Due to disruptions

to support and extend the capability of DT are the Industrial Internet of Things, artificial intelligence, big data, cyber-physical systems, augmented reality, and virtual reality.

The AR application to control industrial variables was developed with the appropriate versions and SDK for using META 2 glasses, creating an intuitive and easy-to-handle environment. Additionally, the Ethernet protocol established bidirectional communication between the physical and virtual environments for approximately 100 ms. PLC S7-1200 hardware, a switch, and an embedded system were used to communicate the systems for field and control level communication, and the OPC-UA protocol was used. Blender, Unity, Vuforia, and Visual Studio software were used to achieve the interaction with the virtual environment and mapping to perform the timely and dynamic adjustment through M2M communication. In this way, data management and production were improved, incorporating the simulation of the process and physical control in real time to execute and trigger actions in the physical equipment simultaneously.

The survey was carried out on university professors with knowledge in the area of Industry 4.0, where the results showed that 87.5% of those surveyed fully agreed with questions R1 and R2 regarding the digital environment used and the feasibility of using the DT as a training system. Meanwhile, in questions R3, R4, and R5, they evaluate the functioning and operation of the DT so that the industrial process complies with the established characteristics, and 91.6% acceptance was obtained.

**Author Contributions:** Conceptualization, G.C. and R.S.; methodology, G.C.; software, G.C. and R.S.; validation, G.C.; investigation, G.C. and R.S.; writing—original draft preparation, G.C. and R.S.; writing—review and editing, G.C.; visualization, G.C.; supervision, R.S.; funding acquisition, G.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** Not applicable.

**Acknowledgments:** Universidad Politécnica de Madrid (UPM) and Universidad Politécnica Salesiana (UPS).

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Tao, F.; Qi, Q.; Wang, L.; Nee, A.Y.C. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering* **2019**, *5*, 653–661. [\[CrossRef\]](#)
2. Lin, W.D.; Low, M.Y.H. Concept design of a system architecture for a manufacturing cyber-physical digital twin system. In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Singapore, 14–17 December 2020; pp. 1320–1324. [\[CrossRef\]](#)
3. Qi, Q.; Tao, F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access* **2018**, *6*, 3585–3593. [\[CrossRef\]](#)
4. Xu, W.; Cui, J.; Li, L.; Yao, B.; Tian, S.; Zhou, Z. Digital twin-based industrial cloud robotics: Framework, control approach, and implementation. *J. Manuf. Syst.* **2021**, *58*, 196–209. [\[CrossRef\]](#)
5. Zhou, X.; Xu, X.; Liang, W.; Zeng, Z.; Shimizu, S.; Yang, L.T.; Jin, Q. Intelligent Small Object Detection Based on Digital Twinning for Smart Manufacturing in Industrial CPS. *IEEE Trans. Ind. Inform.* **2021**, *18*, 1377–1386. [\[CrossRef\]](#)
6. Uhlemann, T.H.J.; Lehmann, C.; Steinhilper, R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP* **2017**, *61*, 335–340. [\[CrossRef\]](#)
7. Wang, T.; Li, J.; Kong, Z.; Liu, X.; Snoussi, H.; Lv, H. Digital twin improved via visual question answering for vision-language interactive mode in human-machine collaboration. *J. Manuf. Syst.* **2021**, *58*, 261–269. [\[CrossRef\]](#)
8. Min, Q.; Lu, Y.; Liu, Z.; Su, C.; Wang, B. Machine Learning based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry. *Int. J. Inf. Manag.* **2019**, *49*, 502–519. [\[CrossRef\]](#)
9. Negri, E.; Fumagalli, L.; Macchi, M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manuf.* **2017**, *11*, 939–948. [\[CrossRef\]](#)
10. Khan, A.; Shahid, F.; Maple, C.; Ahmad, A.; Jeon, G. Towards Smart Manufacturing Using Spiral Digital Twin Framework and Twinchain. *IEEE Trans. Ind. Inform.* **2020**, *18*, 1359–1366. [\[CrossRef\]](#)

11. Sjarov, M.; Lechler, T.; Fuchs, J.; Brossog, M.; Selmaier, A.; Faltus, F.; Donhauser, T.; Franke, J. The Digital Twin Concept in Industry—A Review and Systematization. In Proceedings of the 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Vienna, Austria, 8–11 September 2020; pp. 1789–1796. [\[CrossRef\]](#)
12. Wang, K.; Lee, T.; Hsu, Y.; Lee, T. Revolution on digital twin technology—A patent research approach. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2020**, *107*, 4687–4704. [\[CrossRef\]](#)
13. Perno, M.; Hvam, L.; Haug, A. Enablers and barriers to the implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review. *IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag.* **2020**, *2020*, 959–964. [\[CrossRef\]](#)
14. Josifovska, K.; Yigitbas, E.; Engels, G. Reference Framework for Digital Twins within Cyber-Physical Systems. In Proceedings of the 2019 IEEE/ACM 5th International Workshop on Software Engineering for Smart Cyber-Physical Systems SEsCPS, Montreal, QC, Canada, 28 May 2019; pp. 25–31. [\[CrossRef\]](#)
15. Nagy, B.G.; Dóka, J.; Rácz, S.; Szabó, G.; Pelle, I.; Czentye, J.; Toka, L.; Sonkoly, B. Towards human-robot collaboration: An industry 4.0 VR platform with clouds under the hood. In Proceedings of the 2019 IEEE 27th International Conference on Network Protocols, Chicago, IL, USA, 7–10 October 2019; pp. 4–5. [\[CrossRef\]](#)
16. Yin, Y.; Zheng, P.; Li, C.; Wang, L. A state-of-the-art survey on Augmented Reality-assisted Digital Twin for futuristic human-centric industry transformation. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* **2023**, *81*, 102515. [\[CrossRef\]](#)
17. Padovano, A.; Longo, F.; Nicoletti, L.; Mirabelli, G. A Digital Twin based Service Oriented Application for a 4.0 Knowledge Navigation in the Smart Factory. *IFAC-Pap.* **2018**, *51*, 631–636. [\[CrossRef\]](#)
18. Jeon, S.M.; Schuesslbauer, S. Digital twin application for production optimization. In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Singapore, 14–17 December 2020; pp. 542–545. [\[CrossRef\]](#)
19. Sierla, S.; Sorsamäki, L.; Azangoo, M.; Villberg, A.; Hytönen, E.; Vyyatkin, V. Towards semi-automatic generation of a steady state digital twin of a brownfield process plant. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 6959. [\[CrossRef\]](#)
20. Erol, T.; Mendi, A.F.; Dogan, D. Digital Transformation Revolution with Digital Twin Technology. In Proceedings of the 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies ISMSIT 2020, Istanbul, Turkey, 22–24 October 2020. [\[CrossRef\]](#)
21. Wanasinghe, T.R.; Wroblewski, L.; Petersen, B.K.; Gosine, R.G.; James, L.A.; De Silva, O.; Man, G.K.I.; Warrrian, P.J. Digital Twin for the Oil and Gas Industry: Overview, Research Trends, Opportunities, and Challenges. *IEEE Access* **2020**, *8*, 104175–104197. [\[CrossRef\]](#)
22. Lee, J.; Azamfar, M.; Singh, J.; Siahpour, S. Integration of digital twin and deep learning in cyber-physical systems: Towards smart manufacturing. *IET Collab. Intell. Manuf.* **2020**, *2*, 34–36. [\[CrossRef\]](#)
23. Biesinger, F.; Weyrich, M. The Facets of Digital Twins in Production and the Automotive Industry. In Proceedings of the 2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT), Salerno, Italy, 23–26 October 2019; pp. 1–6. [\[CrossRef\]](#)
24. Ahelerooff, S.; Zhong, R.Y.; Xu, X. A digital twin reference for mass personalization in industry 4.0. *Procedia CIRP* **2020**, *93*, 228–233. [\[CrossRef\]](#)
25. Caiza, G.; Sanz, R. Digital Twin for Monitoring an Industrial Process Using Augmented Reality. In Proceedings of the 2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies, Madrid, Spain, 22–25 June 2022; pp. 22–25. [\[CrossRef\]](#)
26. Bottani, E.; Vignali, G.; Tancredi, G.P.C. A digital twin model of a pasteurization system for food beverages: Tools and architecture. In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation ICE/ITMC, Cardiff, UK, 15–17 June 2020. [\[CrossRef\]](#)
27. Assawaarayakul, C.; Srisawat, W.; Ayuthaya, S.D.N.; Wattanasirichaigoon, S. Integrate Digital Twin to Exist Production System for Industry 4.0. In Proceedings of the TIMES-ICON 2019—2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference, Bangkok, Thailand, 11–13 December 2019. [\[CrossRef\]](#)
28. Vachalek, J.; Bartalsky, L.; Rovny, O.; Sismisova, D.; Morhac, M.; Loksik, M. The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept. In Proceedings of the 2017 21st International Conference on Process Control PC, Pleso, Slovakia, 6–9 June 2017; pp. 258–262. [\[CrossRef\]](#)
29. Rolle, R.P.; Martucci, V.D.O.; Godoy, E.P. Architecture for Digital Twin implementation focusing on Industry 4.0. *IEEE Lat. Am. Trans.* **2020**, *18*, 889–898. [\[CrossRef\]](#)
30. Lu, Y.; Liu, C.; Wang, K.I.K.; Huang, H.; Xu, X. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* **2020**, *61*, 101837. [\[CrossRef\]](#)
31. Zhuang, C.; Miao, T.; Liu, J.; Xiong, H. The connotation of the digital twin, and the construction and application method of shop-floor digital twin. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* **2021**, *68*, 102075. [\[CrossRef\]](#)
32. Hao, Q.; Hongwei, W.; Yu, Z. Constructing Digital Twin for Smart Manufacturing. In Proceedings of the 2021 IEEE 24th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), Dalian, China, 5–7 May 2021; pp. 638–642.
33. Henrique, C.; Gabriel, G.T.; Victor, J.; Arnaldo, J.; Montevechi, B.; De Queiroz, J.A. Decision-making in a fast fashion company in the Industry 4.0 era: A Digital Twin proposal to support operational planning. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2021**, *116*, 1653–1666.
34. Negri, E.; Berardi, S.; Fumagalli, L.; Macchi, M. MES-integrated digital twin frameworks. *J. Manuf. Syst.* **2020**, *56*, 58–71. [\[CrossRef\]](#)
35. Santos, C.H.; de Queiroz, J.A.; Leal, F.; Montevechi, J.A.B. Use of simulation in the industry 4.0 context: Creation of a Digital Twin to optimise decision making on non-automated process. *J. Simul.* **2020**, *16*, 284–297. [\[CrossRef\]](#)

36. Alam, K.M.; El Saddik, A. C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. *IEEE Access* **2017**, *5*, 2050–2062. [\[CrossRef\]](#)
37. Berezovskyi, A.; Inam, R.; El-Khoury, J.; Tomngren, M.; Fersman, E. Efficient state update exchange in a CPS environment for linked data-based digital twins. In Proceedings of the 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics, Helsinki, Finland, 22–25 July 2019; pp. 983–989. [\[CrossRef\]](#)
38. Negri, E.; Fumagalli, L.; Cimino, C.; MacChi, M. FMU-supported simulation for CPS digital twin. *Procedia Manuf.* **2019**, *28*, 201–206. [\[CrossRef\]](#)
39. Sun, W.; Lei, S.; Wang, L.; Liu, Z.; Zhang, Y. Adaptive Federated Learning and Digital Twin for Industrial Internet of Things. *IEEE Trans. Ind. Inform.* **2020**, *17*, 5605–5614. [\[CrossRef\]](#)
40. Castellani, A.; Schmitt, S.; Squartini, S. Real-World Anomaly Detection by using Digital Twin Systems and Weakly-Supervised Learning. *IEEE Trans. Ind. Inform.* **2020**, *17*, 4733–4742. [\[CrossRef\]](#)
41. Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihn, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-Pap.* **2018**, *51*, 1016–1022. [\[CrossRef\]](#)
42. Xia, L.; Lu, J.; Zhang, H. Research on Construction Method of Digital Twin Workshop Based on Digital Twin Engine. In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications AEECA, Dalian, China, 22–25 August 2020; pp. 417–421. [\[CrossRef\]](#)
43. Rasheed, A.; San, O.; Kvamsdal, T. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access* **2020**, *8*, 21980–22012. [\[CrossRef\]](#)
44. Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C.; Barlow, C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges, and Open Research. *IEEE Access* **2020**, *8*, 108952–108971. [\[CrossRef\]](#)
45. Moyne, J.; Qamsane, Y.; Balta, E.C.; Kovalenko, I.; Faris, J.; Barton, K.; Tilbury, D.M. A Requirements Driven Digital Twin Framework: Specification and Opportunities. *IEEE Access* **2020**, *8*, 107781–107801. [\[CrossRef\]](#)
46. Hasan, S.M.; Lee, K.; Moon, D.; Kwon, S.; Jinwoo, S.; Lee, S. Augmented reality and digital twin system for interaction with construction machinery. *J. Asian Archit. Build. Eng.* **2021**, *21*, 564–574. [\[CrossRef\]](#)
47. Caiza, G.; Garcia, C.A.; Naranjo, J.E.; Garcia, M.V. Flexible robotic teleoperation architecture for intelligent oil fields. *Heliyon* **2020**, *6*, e03833. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
48. Stary, C. Digital twin generation: Re-conceptualizing agent systems for behavior-centered cyber-physical system development. *Sensors* **2021**, *21*, 1096. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
49. Radanliev, P.; De Roure, D.; Nicolescu, R.; Huth, M.; Santos, O. Digital twins: Artificial intelligence and the IoT cyber-physical systems. *Int. J. Intell. Robot. Appl.* **2022**, *6*, 171–185. [\[CrossRef\]](#)
50. Guo, D.; Ling, S.; Li, H.; Ao, D.; Zhang, T.; Rong, Y.; Huang, G.Q. A framework for personalized production based on digital twin, blockchain and additive manufacturing in the context of Industry 4.0. In Proceedings of the 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering, Hong Kong, 20–21 August 2020; pp. 1181–1186. [\[CrossRef\]](#)
51. Balderas, D.; Ponce, P.; Molina, A. Empowering Digital Twin for Industry 4.0 using metaheuristic optimization algorithms: Case study PCB drilling optimization. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2021**, *113*, 1295–1306. [\[CrossRef\]](#)
52. Ghita, M.; Siham, B.; Hicham, M.; Abdelhafid, A.; Laurent, D. Digital twins: Development and implementation challenges within Moroccan context. *SN Appl. Sci.* **2020**, *2*, 885. [\[CrossRef\]](#)
53. Preuvencers, D.; Joosen, W.; Ilie-Zudor, E. Robust Digital Twin Compositions for Industry 4.0 Smart Manufacturing Systems. In Proceedings of the IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Workshop EDOCW, Stockholm, Sweden, 16–19 October 2018; pp. 69–78. [\[CrossRef\]](#)
54. Raza, M.; Kumar, P.M.; Hung, D.V.; Davis, W.; Nguyen, H.; Trestian, R. A Digital Twin Framework for Industry 4.0 Enabling Next-Gen Manufacturing. In Proceedings of the ICITM 2020—2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management, Oxford, UK, 11–13 February 2020; pp. 73–77. [\[CrossRef\]](#)
55. Vrana, J. The Core of the Fourth Revolutions: Industrial Internet of Things, Digital Twin, and Cyber-Physical Loops. *J. Nondestruct. Eval.* **2021**, *40*, 46. [\[CrossRef\]](#)
56. Kamath, V.; Morgan, J.; Ali, M.I. Industrial IoT and Digital Twins for a Smart Factory: An open source toolkit for application design and benchmarking. In Proceedings of the GIoTS 2020—Global Internet of Things Summit, Dublin, Ireland, 3 June 2020; pp. 1–6. [\[CrossRef\]](#)
57. Caiza, G.; Bonilla-Vasconez, P.; Garcia, C.A.; Garcia, M.V. Augmented Reality for Robot Control in Low-cost Automation Context and IoT. In Proceedings of the IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vienna, Austria, 8–11 September 2020; pp. 1461–1464. [\[CrossRef\]](#)
58. Wärmefjord, K.; Söderberg, R.; Schleich, B.; Wang, H. Digital twin for variation management: A general framework and identification of industrial challenges related to the implementation. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 3342. [\[CrossRef\]](#)

**Disclaimer/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

## Anexo 2: Publicación (2)



Article

# Immersive Digital Twin under ISO 23247 Applied to Flexible Manufacturing Processes

Gustavo Caiza <sup>1,2,\*</sup> and Ricardo Sanz <sup>1</sup>

- <sup>1</sup> Departamento de Automática, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), 28006 Madrid, Spain; ricardo.sanz@upm.es  
<sup>2</sup> Departamento de Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana (UPS), Quito 170146, Ecuador  
 \* Correspondence: gcaiza@ups.edu.ec

**Abstract:** Digital twin (DT) technology provides a path for implementing cyber-physical systems (CPS) and developing smart manufacturing because they are essential tools for monitoring and controlling manufacturing processes. It is considered a vital technology in smart manufacturing and is being widely researched in academia and industry. Furthermore, the combination of DTs and immersive environments has shown great potential for integrating novel capabilities into the new generation of CPS. This research presents an architecture for implementing immersive digital twins under ISO 23247 in flexible manufacturing processes. The proposed system is based on the integration of DT technologies in conjunction with augmented reality (AR) and gesture tracking, and validation was performed in the sorting station of the MPS 500 to increase the interaction and flexibility between physical and virtual environments in real time, thus enhancing the capabilities of the DT. The methodology used for the design and implementation of the DT includes (1) general principles and requirements; (2) models with functional views based on domains and entities; (3) attributes of the observable manufacturing elements; and (4) protocols for the exchange of information between entities. The results show that the integration of these technologies improves the monitoring, control, and simulation capabilities of processes using 3D resources and immersive environments, achieving a higher level of interactivity. In addition, error detection tests were carried out, where a reduction of time was observed in the resolution of errors that may be caused by internal or external disturbances of the process, thus avoiding production delays.

**Keywords:** digital twin; CPS; IoT; augmented reality; senso glove; Industry 4.0



**Citation:** Caiza, G.; Sanz, R. Immersive Digital Twin under ISO 23247 Applied to Flexible Manufacturing Processes. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 4204. <https://doi.org/10.3390/app14104204>

Academic Editor: Mark J. Jackson

Received: 28 March 2024

Revised: 6 May 2024

Accepted: 9 May 2024

Published: 15 May 2024



**Copyright:** © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Digital transformation has been driven by various technologies, such as cyber-physical systems, big data, Internet of Things (IoT), Industrial Internet of Things (IIoT), mobile devices, cloud computing, robotics, artificial intelligence (AI), blockchain, mixed reality, DTs, and collaborative and social tools [1]. Smart manufacturing, also known as Industry 4.0, aims to enhance productivity, quality, and efficiency in production by integrating technologies to automate and optimize various tasks, including supply chain management, quality control, and production planning [2]. These emerging digital technologies, such as industrial interconnection and DTs, have changed methods, production models, industrial organizations, and international patterns, and the digital economy is transforming and enhancing the manufacturing industry [3]. Industry 4.0 has revolutionized manufacturing systems through several technologies that have proven to be highly valuable. The main ones are virtualization through CPS, IoT, and DTs; these technologies combine data collection and analysis to facilitate interaction between physical and virtual spaces with bidirectional communication [4,5], enabling the connection and visualization of all elements. Moreover, they provide information concisely and seamlessly to facilitate intelligent decision-making, thus accelerating industrial modernization. A cyber-physical system

**Author Contributions:** Conceptualization, G.C. and R.S.; methodology, G.C.; software, G.C. and R.S.; validation, G.C.; investigation, G.C. and R.S.; writing—original draft preparation, G.C. and R.S.; writing—review and editing, G.C.; visualization, G.C.; supervision, R.S.; funding acquisition, G.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** The original contributions presented in the study are included in the article, further inquiries can be directed to the corresponding author.

**Acknowledgments:** This work was supported by Universidad Politécnica de Madrid (UPM) and Universidad Politécnica Salesiana (UPS).

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

## References

1. Wanasinghe, T.R.; Trinh, T.; Nguyen, T.; Gosine, R.G.; James, L.A.; Warrrian, P.J. Human-centric digital transformation and operator 4.0 for the oil and gas industry. *IEEE Access* **2021**, *9*, 113270–113291. [\[CrossRef\]](#)
2. Voinea, G.D.; Gîrbacia, F.; Duguleană, M.; Boboc, R.G.; Gheorghie, C. Mapping the Emergent Trends in Industrial Augmented Reality. *Electronics* **2023**, *12*, 1719. [\[CrossRef\]](#)
3. Wang, F.; Zhe, C.; Sun, M. A study of digital twin-based digital derivation mechanisms for manufacturing companies. In Proceedings of the 2023 5th International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE), Guangzhou, China, 14–16 April 2023; pp. 212–218. [\[CrossRef\]](#)
4. Da Silva Ribeiro Castro, D.; De Sales, A.M.A.; Da Silva Farias, N.J.; De Medeiros, R.L.P.; Da Silva, V.J.; De Lucena Junior, V.F. Monitoring and Controlling Industrial Cyber-Physical Systems with Digital Twin and Augmented Reality. In Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, NV, USA, 6–8 January 2023; pp. 1–4. [\[CrossRef\]](#)
5. Lin, W.D.; Low, M.Y.H. Concept design of a system architecture for a manufacturing cyber-physical digital twin system. In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, 14–17 December 2020; pp. 1320–1324. [\[CrossRef\]](#)
6. Hasan, S.M.; Lee, K.; Moon, D.; Kwon, S.; Jinwoo, S.; Lee, S. Augmented reality and digital twin system for interaction with construction machinery. *J. Asian Archit. Build. Eng.* **2022**, *21*, 564–574. [\[CrossRef\]](#)
7. Durão, L.F.C.S.; Haag, S.; Anderl, R.; Schützer, K.; Zancul, E. Digital twin requirements in the context of industry 4.0. *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.* **2018**, *540*, 204–214. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
8. Lin, W.D.; Low, M.Y.H. Design and Development of a Digital Twin Dashboards System under Cyber-physical Digital Twin Environment. In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, 13–16 December 2021; pp. 1716–1720. [\[CrossRef\]](#)
9. Dani, A.A.H.; Supangkat, S.H. Combination of Digital Twin and Augmented Reality: A Literature Review. In Proceedings of the 2022 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS), Bandung, Indonesia, 10–11 August 2022; Recover Together, Recover Stronger Smarter Smartization, Gov. Collab. ICISS 2022—Proceeding. pp. 1–6. [\[CrossRef\]](#)
10. Vyskočil, J.; Douda, P.; Novák, P.; Wally, B. A Digital Twin-Based Distributed Manufacturing Execution System for Industry 4.0 with AI-Powered On-The-Fly Replanning Capabilities. *Sustainability* **2023**, *15*, 6251. [\[CrossRef\]](#)
11. Bambura, R.; Solc, M.; Dado, M.; Kotek, L. Implementation of a digital twin for engine block manufacturing processes. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 6578. [\[CrossRef\]](#)
12. Wärmefjord, K.; Söderberg, R.; Schleich, B.; Wang, H. Digital twin for variation management: A general framework and identification of industrial challenges related to the implementation. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 3342. [\[CrossRef\]](#)
13. Caiza, G.; Sanz, R. Digital Twin for Monitoring an Industrial Process Using Augmented Reality. In Proceedings of the 2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Madrid, Spain, 22–25 June 2022; pp. 22–25. [\[CrossRef\]](#)
14. Abbou, A.; Hajji, A. *Increasing the Efficiency of Industry 4.0*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2023. [\[CrossRef\]](#)
15. Schmidtberg, E.; Goff, L.; Moubay, A.; Toy, G. Utilizing Virtual Reality to Enhance the Digital Twin. In Proceedings of the 2022 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), Tucson, AZ, USA, 24–27 January 2022. [\[CrossRef\]](#)
16. Yin, Y.; Zheng, P.; Li, C.; Wang, L. A state-of-the-art survey on Augmented Reality-assisted Digital Twin for futuristic human-centric industry transformation. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* **2023**, *81*, 102515. [\[CrossRef\]](#)
17. Vidal-Balea, A.; Blanco-Novoa, O.; Fraga-Lamas, P. Reality Digital Twin: Developing the Future of Shipyard 4.0.2. In Proceedings of the 7th EAI International Conference, SmartCity360°, Virtual Event, 2–4 December 2021; Springer: Cham, Switzerland, 2022; pp. 104–120. [\[CrossRef\]](#)
18. Caiza, G.; Bonilla-Vasconez, P.; Garcia, C.A.; Garcia, M.V. Augmented Reality for Robot Control in Low-cost Automation Context and IoT. In Proceedings of the 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vienna, Austria, 8–11 September 2020; pp. 1461–1464. [\[CrossRef\]](#)

19. Zhang, X.; Ju, J.; Yang, W.; Lv, X. *Predictive Maintenance System for Complex Mining Equipment Based on Digital Twin*; Springer: Singapore, 2022; Volume 29. [CrossRef]
20. Abdullahi, I.; Longo, S.; Samie, M. Towards a Distributed Digital Twin Framework for Predictive Maintenance in Industrial Internet of Things (IIoT). *Sensors* **2024**, *24*, 2663. [CrossRef]
21. Chen, B.; Liu, K.; Yu, T.; Li, R. Enhancing Reliability in Floating Offshore Wind Turbines through Digital Twin Technology: A Comprehensive Review. *Energies* **2024**, *17*, 1964. [CrossRef]
22. Pacheco-Blazquez, R.; Di Capua, D.; García-Espinosa, J.; Pastor, A. A Digital Twin for Assessment of Remaining Useful Life of Offshore Wind Turbines Structure. 2023. Available online: [https://www.researchgate.net/publication/375115616\\_A\\_Digital\\_Twin\\_for\\_Assessment\\_of\\_Remaining\\_Useful\\_Life\\_of\\_Offshore\\_Wind\\_Turbines\\_Structure](https://www.researchgate.net/publication/375115616_A_Digital_Twin_for_Assessment_of_Remaining_Useful_Life_of_Offshore_Wind_Turbines_Structure) (accessed on 15 February 2024).
23. Liu, W.; Han, B.; Zheng, A.; Zheng, Z. Fault Diagnosis for Reducers Based on a Digital Twin. *Sensors* **2024**, *24*, 2575. [CrossRef] [PubMed]
24. Cai, H.; Wan, J. Digital Twin-Driven Multi-Factor Production Capacity Prediction for Discrete Manufacturing Workshop. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 3119. [CrossRef]
25. Zafeiropoulos, A.; Karyotis, V.; Papavassiliou, S. Digital Twin Meets Knowledge Graph for Intelligent Manufacturing Processes. *Sensors* **2024**, *24*, 2618. [CrossRef] [PubMed]
26. Araque, J.G.; Angel, L.; Viola, J. Digital Twin-Enabled Modelling of a Multivariable Temperature Uniformity Control System. *Electronics* **2024**, *13*, 1419. [CrossRef]
27. Gonzalez, O.B. Physical Modeling of a Water Hydraulic Proportional Cartridge Valve for a Digital Twin in a Hydraulic Press Machine. *Processes* **2024**, *12*, 693. [CrossRef]
28. Boschetti, G. Designing Digital Twins of Robots Using Simscape Multibody. *Robotics* **2024**, *13*, 62. [CrossRef]
29. Rig, L.; Fabianov, J.; Lokš, M.; Mikušov, N. Utilising Digital Twins to Bolster the Sustainability of Logistics Processes in Industry 4.0. *Sustainability* **2024**, *16*, 2575. [CrossRef]
30. Leiras, V.; Dixe, S.; da Costa, N.M.; Azevedo, L.F.; Cardoso, P.; Fonseca, J.C.; Moreira, A.H.J.; Borges, J. ISO23247 Digital Twin Approach for Industrial Grade Radio Frequency Testing Station. In Proceedings of the 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Stuttgart, Germany, 6–9 September 2022. [CrossRef]
31. Caiza, G.; Sanz, R. Digital Twin to Control and Monitor an Industrial Cyber-Physical Environment Supported by Augmented Reality. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 7503. [CrossRef]
32. González-Herbón, R.; González-Mateos, G.; Rodríguez-Ossorio, J.R.; Domínguez, M.; Alonso, S.; Fuertes, J.J. An Approach to Develop Digital Twins in Industry. *Sensors* **2024**, *24*, 998. [CrossRef]
33. Song, J.; Park, S.; Lee, K.; Bae, J.; Kwon, S.; Cho, C.S.; Chung, S. Augmented Reality-Based BIM Data Compatibility Verification Method for FAB Digital Twin implementation. *Buildings* **2023**, *13*, 2683. [CrossRef]
34. ISO TC 184/SC 4; Automation Systems and Integration-Digital Twin Framework for Manufacturing—Part 1: Overview and General Principles. ISO: Geneva, Switzerland, 2021. Available online: <https://www.iso.org> (accessed on 15 February 2024).
35. ISO/TC 10. ISO 16792:2021 Technical Product Documentation Digital Product Definition Data Practices. Volume Third Edit, 2021. p. 76. Available online: <https://www.iso.org/standard/73871.html> (accessed on 15 February 2024).
36. Fahmi, F.; Nainggolan, F.; Siregar, B.; Zarlis, M. User experience study on crane operator erection simulator using senso glove in a virtual reality environment. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2020**, *851*, 012023. [CrossRef]
37. Fahmi, F.; Tanjung, K.; Nainggolan, F.; Siregar, B.; Mubarakah, N.; Zarlis, M. Comparison study of user experience between virtual reality controllers, leap motion controllers, and senso glove for anatomy learning systems in a virtual reality environment. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2020**, *851*, 012024. [CrossRef]
38. Gupta, N.; Adeptu, V.; Tathacharya, M.; Siraj, S.; Pal, S.; Sahatiya, P.; Kuila, B.K. Piezoresistive pressure sensor based on conjugated polymer framework for pedometer and smart tactile glove applications. *Sens. Actuators A Phys.* **2023**, *350*, 114139. [CrossRef]

**Disclaimer/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

## Anexo 3: Publicación (3)



Article

## An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes

Gustavo Caiza <sup>1,2,\*</sup> and Ricardo Sanz <sup>1</sup><sup>1</sup> Departamento de Automática, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), 28006 Madrid, Spain<sup>2</sup> Departamento de Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana (UPS), Quito 170146, Ecuador

\* Correspondence: gcaiza@ups.edu.ec

**Abstract:** The present research proposes the implementation of an architecture for industrial process monitoring and control for a manufacturing execution system (MES) using an immersive digital twin (DT). For the design of the proposal, cyber-physical systems (CPS), MES, robotics, the Internet of Things, augmented reality, virtual reality, and open platform communication-unified architecture (OPC UA) communication protocols were used to integrate these technologies and enhance the functionalities of the DT by providing greater performance. The proposed work is implemented in an Industry 4.0 laboratory that is composed of Festo Cyber-Physical Factory and CP-Lab stations. The implementation of the architecture is based on ISO 23247, where the following requirements were considered for the design of DTs: (1) observable attributes and 3D design and visualization of all physical production lines in all of their stages, (2) a communication entity through the OPC UA protocol for the collection of state changes of manufacturing elements, (3) a DT entity where digital models are modeled and updated based on the collected data, and (4) user entities through the use of AR and VR to make manufacturing more efficient. The experimental results showed that the architecture enables interoperability between different platforms and control subsystems. It allows for the detection and diagnosis of problems during the execution of the production line; in addition, the high-fidelity simulation and AR and VR environments provided by the DT with data obtained in real time can improve the accuracy and efficiency of manufacturing through a more detailed analysis of the process, providing advantages such as interactive creation for customized products and continuous innovation.

**Keywords:** digital twin; CPS; MES; Industry 4.0; virtual reality; augmented reality



**Citation:** Caiza, G.; Sanz, R. An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 4125. <https://doi.org/10.3390/app14104125>

Academic Editors: Junfeng Wang and Jose Machado

Received: 10 March 2024

Revised: 8 April 2024

Accepted: 1 May 2024

Published: 13 May 2024



**Copyright:** © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### 1. Introduction

Manufacturing systems are facing a new revolution based on the digitization of assets, processes, and computing capabilities imposed by new data-driven digital architectures. These initiatives emphasize their applications in the manufacturing industry to transform production systems into a new generation of systems that are equipped with CPS characterized by a strong interconnection between the physical and digital worlds. Among all of the enabling technologies of Industry 4.0, the DT is considered to lead the way for cyber-physical integration. With the constant and growing demand for products, several companies have driven forward and adapted to the industrial revolution to face the challenge of decreasing delivery times and having higher quality and product reliability. Therefore, the industry is facing a new revolution, based on the digitization of assets, processes, and computing capabilities imposed by the new data-driven digital architectures [1].

Industry 4.0 drives digital transformation, enabling better operational performance through disruptive technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), cloud computing (CC), CPS, DT, and big data which have contributed to the rapid

## 6. Conclusions

The experimental results of the proposed architecture of the DT with the MES show that the system allows for interoperability between different control subsystems, improving the management and analysis of the processes through the devices of the manufacturing system. In addition, the DT allows for the detection and diagnosis of problems during the execution of the process because in the industry one of the problems presented is the internal or external disturbances that the production line may have, which generates downtime; however, thanks to the advantages of DTs, these errors can be identified faster than in the conventional system, considerably reducing times as shown in Figure 8.

Through the high-fidelity simulation and AR and VR environments provided by the DT with the data obtained in real time, manufacturing precision and efficiency can be improved through a more detailed analysis of the process, providing advantages such as interactive creation for personalized products and continuous innovation. It can also be used for the training and education of operators in industry and students in the classroom because they are interactive and safe environments, and thanks to the features, decision-making is improved, which directly benefits the optimization and performance of the production.

One of the main reasons why the OPC UA protocol was used is because of its flexibility because it allows for horizontal and vertical communication between subsystems at different levels of the automation pyramid. Therefore, by having management, process, and field levels in the MES, the protocol allows the data to be easily obtained to be sent to the DT and can allow for bidirectional communication between the physical and virtual entities.

**Author Contributions:** Conceptualization, G.C. and R.S.; methodology, G.C.; software, G.C. and R.S.; validation, G.C.; investigation, G.C. and R.S.; writing—original draft preparation, G.C. and R.S.; writing—review and editing, G.C.; visualization, G.C.; supervision, R.S.; funding acquisition, G.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** The original contributions presented in the study are included in the article, further inquiries can be directed to the corresponding author.

**Acknowledgments:** The authors would like to sincerely thank Universidad Politécnica de Madrid (UPM) and Universidad Politécnica Salesiana (UPS).

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

## References

1. Moreno, T.; Almeida, A.; Toscano, C.; Ferreira, F.; Azevedo, A. Scalable Digital Twins for industry 4.0 digital services: A dataspace approach. *Prod. Manuf. Res.* **2023**, *11*, 2173680. [\[CrossRef\]](#)
2. Cabral, J.V.A.; Gasca, E.A.R.; Alvares, A.J. Digital Twin Implementation for Machining Center Based on ISO 23247 Standard. *IEEE Lat. Am. Trans.* **2023**, *21*, 628–635. [\[CrossRef\]](#)
3. Tao, F.; Qi, Q.; Wang, L.; Nee, A.Y.C. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering* **2019**, *5*, 653–661. [\[CrossRef\]](#)
4. Mubarak, A.; Asmelash, M.; Azhari, A.; Alemu, T.; Mulubrhan, F.; Saptaji, K. Digital Twin Enabled Industry 4.0 Predictive Maintenance Under Reliability-Centred Strategy. In Proceedings of the 2022 First International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT), Trichy, India, 16–18 February 2022; pp. 1–6. [\[CrossRef\]](#)
5. García, Á.; Bregon, A.; Martínez-Prieto, M.A. Digital Twin Learning Ecosystem: A cyber-physical framework to integrate human-machine knowledge in traditional manufacturing. *Internet Things* **2024**, *25*, 101094. [\[CrossRef\]](#)
6. Assawaarayakul, C.; Srisawat, W.; Ayuthaya, S.D.N.; Wattanasirichaigoon, S. Integrate Digital Twin to Exist Production System for Industry 4.0. In Proceedings of the 2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-ICON), Bangkok, Thailand, 11–13 December 2019. [\[CrossRef\]](#)
7. Benhamou, L.; Lamouri, S.; Burlat, P.; Giard, V. Digital Twin: An Added Value for Digital CONWIP in the Context of Industry 4.0. *Sustainability* **2023**, *15*, 9874. [\[CrossRef\]](#)

8. Raza, M.; Kumar, P.M.; Hung, D.V.; Davis, W.; Nguyen, H.; Trestian, R. A Digital Twin Framework for Industry 4.0 Enabling Next-Gen Manufacturing. In Proceedings of the 2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM), Oxford, UK, 11–13 February 2020; pp. 73–77. [\[CrossRef\]](#)
9. Lin, W.D.; Low, M.Y.H. Concept design of a system architecture for a manufacturing cyber-physical digital twin system. In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, 14–17 December 2020; pp. 1320–1324. [\[CrossRef\]](#)
10. Hossain, M.J.; Mahmud, M.A.; Milano, F.; Bacha, S.; Hably, A. Design of Robust Distributed Control for Interconnected Microgrids. *IEEE Trans. Smart Grid* **2016**, *7*, 2724–2735. [\[CrossRef\]](#)
11. Azangoo, M.; Salmi, J.; Yrjölä, I.; Bensky, J.; Santillan, G.; Papakonstantinou, N.; Sierla, S.; Vyatkin, V. Hybrid Digital Twin for process industry using Apros simulation environment. In Proceedings of the 2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vasteras, Sweden, 7–10 September 2021; pp. 4–7. [\[CrossRef\]](#)
12. Ciganek, J.; Zemla, F. Design of Digital Twin for PLC System. In Proceedings of the 2022 Cybernetics & Informatics (K&I), Visegrád, Hungary, 11–14 September 2022; pp. 1–6. [\[CrossRef\]](#)
13. Ogunsakin, R.; Mehandjiev, N.; Marin, C.A. Towards adaptive digital twins architecture. *Comput. Ind.* **2023**, *149*, 103920. [\[CrossRef\]](#)
14. Panarotto, M.; Isaksson, O.; Vial, V. Cost-efficient digital twins for design space exploration: A modular platform approach. *Comput. Ind.* **2023**, *145*, 103813. [\[CrossRef\]](#)
15. Negri, E.; Berardi, S.; Fumagalli, L.; Macchi, M. MES-integrated digital twin frameworks. *J. Manuf. Syst.* **2020**, *56*, 58–71. [\[CrossRef\]](#)
16. Gichane, M.M.; Byiringiro, J.B.; Chesang, A.K.; Nyaga, P.M.; Langat, R.K.; Smajic, H.; Kiiru, C.W. Digital triplet approach for real-time monitoring and control of an elevator security system. *Designs* **2020**, *4*, 9. [\[CrossRef\]](#)
17. Stojanovic, L.; Usländer, T.; Volz, F.; Weißenbacher, C.; Müller, J.; Jacoby, M.; Bischoff, T. Methodology and Tools for Digital Twin Management—The FA3ST Approach. *Internet Things* **2021**, *2*, 717–740. [\[CrossRef\]](#)
18. Wang, H.; Yang, Z. A Digital Twin Platform Integrating Process Parameter Simulation Solution for Intelligent Manufacturing. *Electronics* **2024**, *13*, 802. [\[CrossRef\]](#)
19. Redelinghuys, A.J.H.; Basson, A.H.; Kruger, K. A six-layer architecture for the digital twin: A manufacturing case study implementation. *J. Intell. Manuf.* **2020**, *31*, 1383–1402. [\[CrossRef\]](#)
20. Bin Touhid, M.T.; Marne, M.; Oskroba, T.; Mirahmadi, S.A.; Zhu, E.; Mehrabian, A.; Defersha, F. Building a cloud-based digital twin for remote monitoring and control of a robotic assembly system. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2023**, *129*, 4045–4057. [\[CrossRef\]](#)
21. Strelec, P.; Horak, T.; Kovac, S.; Nemlaha, E.; Tanuska, P. IIoT Device Prototype Design Using State Machine According to OPC UA. *IEEE Access* **2022**, *10*, 134004–134017. [\[CrossRef\]](#)
22. Abdelsattar, A.; Park, E.J.; Marzouk, A. An OPC UA Client/Gateway-Based Digital Twin Architecture of a SCADA System with Embedded System Connections. In Proceedings of the 2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Sapporo, Japan, 11–15 July 2022; pp. 798–803. [\[CrossRef\]](#)
23. He, Q. Research on Intelligent Industrial Digital Manufacturing System Based on Industry 4.0 Computer Technology. In Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Electrical, Automation and Computer Engineering (ICEACE), Changchun, China, 29–31 December 2023; Volume 11, pp. 1037–1041. [\[CrossRef\]](#)
24. Zhang, C.; Zhou, G.; Ma, D.; Wang, Z.; Zou, Y. Digital twin-driven multi-dimensional assembly error modeling and control for complex assembly process in Industry 4.0. *Adv. Eng. Inform.* **2024**, *60*, 102390. [\[CrossRef\]](#)
25. Vyskočil, J.; Douda, P.; Novák, P.; Wally, B. A Digital Twin-Based Distributed Manufacturing Execution System for Industry 4.0 with AI-Powered On-The-Fly Replanning Capabilities. *Sustainability* **2023**, *15*, 6251. [\[CrossRef\]](#)
26. Song, J.; Park, S.; Lee, K.; Bae, J.; Kwon, S.; Cho, C.-S.; Chung, S. Augmented Reality-Based BIM Data Compatibility Verification Method for FAB Digital Twin implementation. *Buildings* **2023**, *13*, 2683. [\[CrossRef\]](#)
27. González-Herbón, R.; González-Mateos, G.; Rodríguez-Ossorio, J.R.; Domínguez, M.; Alonso, S.; Fuertes, J.J. An Approach to Develop Digital Twins in Industry. *Sensors* **2024**, *24*, 998. [\[CrossRef\]](#)
28. Caiza, G.; Sanz, R. Digital Twin to Control and Monitor an Industrial Cyber-Physical Environment Supported by Augmented Reality. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 7503. [\[CrossRef\]](#)
29. Fernández-Mireles, V.; Martínez-Cruz, M.; Cardenas-Juarez, M.; Montalvo-Rodríguez, Á.; Alemán-Mendiola, V. Design and Implementation of an Augmented Reality-based App for Assembly Lines in Industry 4.0. In Proceedings of the 2023 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, 18–20 October 2023; pp. 1–6. [\[CrossRef\]](#)
30. Leng, B.; Gao, S.; Xia, T.; Pan, E.; Seidelmann, J.; Wang, H.; Xi, L. Digital twin monitoring and simulation integrated platform for reconfigurable manufacturing systems. *Adv. Eng. Inform.* **2023**, *58*, 102141. [\[CrossRef\]](#)
31. Arm, J.; Benesl, T.; Marcon, P.; Bradac, Z.; Schröder, T.; Belyaev, A.; Werner, T.; Braun, V.; Kamensky, P.; Zezulka, F.; et al. Automated design and integration of asset administration shells in components of industry 4.0. *Sensors* **2021**, *21*, 2004. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
32. Cavaliere, S.; Gambadoro, S. Proposal of Mapping Digital Twins Definition Language to Open Platform Communications Unified Architecture. *Sensors* **2023**, *23*, 2349. [\[CrossRef\]](#)

33. *ISO TC 184/SC 4; Automation Systems and Integration-Digital Twin Framework for Manufacturing—Part 1: Overview and General Principles*. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2021; Volume 2021. Available online: <https://www.iso.org/committee/54158.html> (accessed on 20 February 2024).
34. Li, Y.; Jiang, J.; Lee, C.; Hong, S.H. Practical Implementation of an OPC UA TSN Communication Architecture for a Manufacturing System. *IEEE Access* **2020**, *8*, 200100–200111. [[CrossRef](#)]

**Disclaimer/Publisher’s Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.