



UNIVERSIDAD DE GRANADA

Programa de Doctorado en Tecnologías de la Información y
Comunicación

Diseño de sistemas inteligentes de realidad virtual para la monitorización de entornos en Smart Factory

Autor

Luis Omar Alpala

Directores

Juan Carlos Torres

Diego Hernán Peluffo

Tesis presentada para optar el grado de:
Doctor por la Universidad de Granada

Granada, Julio de 2023

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Luis Omar Alpala
ISBN: 978-84-1195-090-9
URI: <https://hdl.handle.net/10481/85698>

Resumen

Trabajar de forma colaborativa se beneficia de que los miembros del equipo estén en el mismo lugar. Sin embargo, dado que los participantes colaboradores en un equipo de trabajo están cada vez más dispersos en un mundo interconectado, las personas y las organizaciones recurren a internet como medio para trabajar y aprender juntos.

Los entornos virtuales colaborativos (EVC), ya sea en su representación 2D o 3D, intentan proporcionar a los participantes una sensación de estar juntos o copresentes. Los participantes pueden encontrarse en cualquier parte del mundo y, con solo una conexión a internet, un dispositivo y un aplicativo de software virtual, pueden interactuar en tiempo real en actividades de interés. Un tipo de EVC que facilita actividades particularmente inmersivas en tiempo real son los entornos virtuales 3D. Es por esto que, para esta investigación, se realiza un estudio sobre el diseño y desarrollo de entornos virtuales 3D en realidad virtual y metaverso para analizar el trabajo colaborativo, inmersión y comunicación que los usuarios pueden experimentar en tiempo real para entrenamiento y capacitación.

Por tanto, para esta investigación, se propuso el diseño y desarrollo de un framework para un sistema de realidad virtual, que constituye el primer paso en el proceso de formalizar la colaboración en entornos virtuales a través de metaversos potenciados por la realidad virtual. Incluye en su estructura una serie de componentes funcionales, configuraciones orientadas a objetos, núcleo avanzado, interfaces y un sistema multiusuario en línea, centrados en dos módulos específicos propios de la investigación: el diseño modular y la monitorización en *Smart Factory*. Además, como parte de este trabajo, se desarrolló una plataforma de metaverso en línea que brinda soporte de documentación al framework.

Finalmente, para validar esta investigación se presenta el primer estudio caso con el proyecto denominado *Digital Factory Metaverse*. Para ello, se realizaron y evaluaron pruebas de funcionalidad y usabilidad del aplicativo con diferentes usuarios. Los resultados de estas pruebas mostraron un potencial uso educativo y comercial satisfactorio del aplicativo. Estos resultados son de gran importancia, ya que contribuyen a la capacitación y entrenamiento del personal, así como a la inclusión y adaptación de estas tecnologías en entornos personalizados en los procesos productivos de diferentes sectores de empresas e instituciones educativas.

Abstract

Working collaboratively benefits from team members being in the same location. However, as collaborating participants in a work team become increasingly dispersed in an interconnected world, individuals and organizations turn to the Internet as a means to work and learn together.

Collaborative Virtual Environments (CVEs), whether in their 2D or 3D representation, aim to provide participants with a sense of being together or co-present. Participants can be located anywhere in the world and, with just an internet connection, a device, and virtual software application, they can interact in real-time in activities of interest. One type of CVE that enables particularly immersive real-time activities is 3D Virtual Environments. Therefore, for this research, a study is conducted on the design and development of 3D virtual environments in virtual reality and the metaverse to analyze collaborative work, immersion, and communication that users can experience in real-time for training and education.

Consequently, for this research, the design and development of a framework for a virtual reality system were proposed, which represents the first step in formalizing collaboration in virtual environments through metaverses empowered by virtual reality. The framework includes a set of functional components, object-oriented configurations, advanced core, interfaces, and an online multi-user system, focused on two specific research modules: modular design and monitoring in *Smart Factory*. Additionally, as part of this work, an online metaverse platform was developed to provide documentation support to the framework. Finally, to validate this research, the first case study is presented with the project named *Digital Factory Metaverse*. To achieve this, functionality and usability tests of the application were conducted and evaluated with different users. The results of these tests demonstrated a satisfactory potential for educational and commercial use of the application. These results are of great importance as they contribute to staff training and education, as well as the integration and adaptation of these technologies in personalized environments within the production processes of different business sectors and educational institutions.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Lista de Figuras	VIII
Lista de Tablas	X
1. Introducción	1
1.1. Motivación y planteamiento del problema	1
1.1.1. Motivación	1
1.1.2. Planteamiento del problema	2
1.1.3. Formulación del problema	3
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Originalidad y contribución de la Investigación	6
1.4.1. Originalidad	6
1.4.2. Contribuciones de esta tesis	6
1.5. Estructura de la tesis	8
2. Antecedentes	9
2.1. Entornos virtuales colaborativos 3D	10
2.1.1. Características de los entornos virtuales colaborativos 3D	10
2.1.2. Inmersión y presencia en entornos virtuales colaborativos	12
2.1.3. Tipos de entornos virtuales colaborativos 3D en realidad virtual	12
2.2. Realidad virtual y metaverso	13
2.2.1. Antecedentes de realidad virtual y metaverso	14
2.2.2. Plataformas de desarrollo de aplicativos de realidad virtual	15
2.2.3. Investigación en y sobre mundos virtuales con realidad virtual	16

2.3.	La Smart Factory en Industria 4.0	17
2.3.1.	Cuarta revolución industrial - I4.0	17
2.3.2.	Smart Factory	18
2.4.	Diseño modular y colaborativo en realidad virtual	18
2.4.1.	Diseño modular en Industria 4.0	19
2.4.2.	Diseño de interacciones con realidad virtual	20
2.4.3.	Diseño de experiencias virtuales con realidad virtual	21
2.5.	Monitorización en Smart Factory basado en realidad virtual	22
2.5.1.	Monitorización en Smart Factory	22
2.5.2.	Analítica de datos con realidad virtual, su uso, desarrollo y aplicación en una Smart Factory	23
2.6.	Síntesis	24
3.	Diseño 3D de entornos virtuales: Una primera aproximación al desarrollo de un Framework de realidad virtual	25
3.1.	Motivación	25
3.2.	Primera aproximación al desarrollo de un framework de realidad virtual basado el diseño de entornos virtuales 3D	26
3.2.1.	Diseño de entornos virtuales basado en el enfoque modular	27
3.2.2.	Diseño de entornos 3D para realidad virtual y metaverso	30
3.3.	Estudio de caso	32
3.3.1.	Proyecto-Digital Factory Metaverse	32
3.3.1.1.	Historia y guionización del proyecto	33
3.3.1.2.	Género	34
3.3.1.3.	Público objetivo	34
3.3.1.4.	Plataformas y Hardware necesario	35
3.3.1.5.	Software utilizados para el diseño y desarrollo del proyecto	36
3.3.2.	Diseño y montaje del proyecto Digital Factory Metaverse	37
3.3.3.	Aplicación de tecnologías de Smart Factory en el caso de estudio	47
3.4.	Conclusiones	49
4.	Desarrollo de un Framework para realidad virtual basado en colaboración	51
4.1.	Motivación	51
4.2.	Desarrollo de un framework basado en la realidad virtual y metaverso	52
4.2.1.	Originalidad del Framework	52
4.2.2.	Componentes del Framework	54
4.2.2.1.	Bases	54
4.2.2.2.	Controladores	55
4.2.2.3.	Sistema de componentes	56
4.2.2.4.	Entornos	57
4.2.2.5.	Multiusuario	58

4.2.2.6.	Interfaces de usuario y gestión de datos en el Framework	62
4.3.	Propuesta de metodología para trabajar proyectos de realidad virtual	62
4.4.	Desarrollo de una plataforma para proyectos de metaverso	65
4.4.1.	Diseño y desarrollo de la plataforma Virprot	66
4.4.2.	Estructura de Virprot	67
4.4.3.	Diferenciación de Virprot	68
4.4.3.1.	Análisis de creación de metaversos en diferentes plataformas	69
4.4.3.2.	Características del metaverso	71
4.5.	Conclusiones	73
5.	Integración de una función basada en diseño modular para Smart Factory	74
5.1.	Motivación	74
5.2.	Propuesta de Integración de una función basada en diseño modular para Smart Factory en el framework principal de realidad virtual y metaverso	75
5.2.1.	Relación de los sistemas modulares en plantas de producción en Smart Factory	76
5.2.1.1.	Innovación y desarrollo tecnológico para sistemas modulares	76
5.2.1.2.	Tipos de modularización	77
5.2.1.3.	Modularización en ingeniería y ciclo de vida de la planta	78
5.2.1.4.	Documentación para el diseño modular de plantas industriales a pequeña escala	80
5.2.2.	Sistema de componentes	82
5.2.2.1.	Componentes para diseño modular	82
5.2.2.2.	Sistema de catálogo de componentes	83
5.2.2.3.	Configuración y distribución flexible de componentes en área de trabajo	84
5.2.2.4.	Sistema de interfaces de usuario y datos	85
5.2.2.5.	Sistema multiusuario	86
5.3.	Implementación de componentes de diseño modular aplicados al caso de estudio	86
5.3.1.	Creación de escenarios mediante componentes modulares	87
5.3.1.1.	Sistema de interfaces de usuario y datos	88
5.3.1.2.	Sistema multiusuario	88
5.4.	Conclusiones	89
6.	Integración de una función basada en monitorización de procesos para Smart Factory	90
6.1.	Motivación	90

6.2.	Propuesta de integración de una función basada en monitorización de procesos para Smart Factory en el Framework principal de realidad virtual y metaverso	91
6.2.1.	Sistema monitorización en Smart Factory	92
6.2.1.1.	Sistema de monitorización de plantas industriales en enfoque de Smart Factory	92
6.2.1.2.	Tipos de monitorización en Smart Factory	93
6.2.1.3.	Niveles tecnológicos de monitorización de procesos industriales	94
6.2.1.4.	Relación entre la monitorización y la analítica de datos en Smart Factory	95
6.2.1.5.	Sistemas de monitorización basados en realidad virtual y metaverso dentro de un contexto de Smart Factory	95
6.2.2.	Proceso de monitorización basado en realidad virtual y metaverso dentro de un contexto de Smart Factory	97
6.2.3.	Sistema de componentes de monitorización integrados en el framework de realidad virtual	98
6.2.3.1.	Componentes de bases de datos, simulación y de visualización	99
6.2.3.2.	Componentes de visualización e interacción	99
6.2.3.3.	Componentes de captura de datos	100
6.2.3.4.	Componentes plugins para monitorización	101
6.3.	Sistema de monitorización aplicado en el caso de estudio	102
6.3.1.	Indicadores KPI para una monitorización	102
6.3.1.1.	Indicadores de monitorización de maquinaria	103
6.3.1.2.	Indicadores de monitorización de procesos	104
6.3.1.3.	Indicadores de monitorización de calidad	105
6.3.1.4.	Indicadores de monitorización de recursos	106
6.3.2.	Integración del sistema de monitorización	107
6.3.2.1.	Construcción de bases de datos para monitorización	108
6.3.2.2.	Construcción de dashboards en el software Power BI y Unreal Engine	110
6.4.	Conclusiones	112
7.	Evaluación de la propuesta	114
7.1.	Motivación	114
7.2.	Diseño experimental	114
7.2.1.	Participantes	114
7.2.2.	Equipamiento utilizado para las pruebas	115
7.3.	Procedimiento para realizar pruebas de usabilidad	115
7.4.	Resultados de las pruebas de usabilidad	117

7.4.1. Guías de prácticas de laboratorio para el aplicativo de realidad virtual	117
7.4.1.1. Utilidad de las Guías	118
7.4.1.2. Presentación de las Guías	118
7.4.2. Definición de métricas para pruebas de usabilidad	119
7.4.3. Análisis de las métricas	122
7.4.4. Propuestas de mejora	127
7.5. Discusión de resultados de la tesis	128
8. Conclusiones y trabajos futuros	130
8.1. Conclusiones	130
8.2. Trabajos futuros	131
8.3. Contribuciones de esta tesis	131
A. Repositorio de proyecto Digital Factory Metaverse	133
B. Cuestionario de pruebas de usabilidad	134
C. Aplicación de la metodología SLP para el proyecto Digital Factory Metaverse	139
D. Documento de Diseño del Juego	144
E. Bases de datos para monitorización	147
F. Guías de prácticas de laboratorio para el aplicativo de realidad virtual	149
Bibliografía	152

Lista de Figuras

1.1. Contribuciones de la investigación.	7
2.1. Representación de metodología de áreas de investigación para la tesis doctoral	9
3.1. Primera aproximación a desarrollo de framework para diseño 3D de entornos virtuales	26
3.2. Metodología para el diseño de distribución de plantas en un contexto de Industria 4.0	28
3.3. Metodología de trabajo con entornos 3D en realidad virtual y metaverso.	30
3.4. Pantalla de inicio de la aplicación Digital Factory Metaverse	33
3.5. Público objetivo del proyecto	35
3.6. Ejemplo de boceto utilizando para el diseño del proyecto	37
3.7. Estética y UI para el proyecto	38
3.8. Materiales y texturas para el proyecto	39
3.9. Diseño de sistema de iluminación para proyecto	40
3.10. Diseño del nivel 1 Lobby	42
3.11. Diseño del nivel 2 zona externa	43
3.12. Diseño del nivel 3 zona administrativa	44
3.13. Diseño del nivel 4 zona de materia prima	45
3.14. Diseño del nivel 5 zona de producción	46
3.15. Diseño del nivel 6 zona de producto terminado	47
3.16. Aplicación de algunas tecnologías de la Industria 4.0 en el caso de estudio	49
4.1. Estructura del desarrollo del Framework en UE5	53
4.2. Propuesta de framework experimental de sistema realidad virtual	54
4.3. Sistema de componentes por carpetas en el framework	57
4.4. Estructura de entornos en el framework	58
4.5. Funciones más importantes de desarrollo para multiusuario	59
4.6. Modo multiusuario de la aplicación basado en avatares	61
4.7. Interfaz de inicio de sesión multiusuario	61

4.8. Metodología de desarrollo de proyectos en realidad virtual	63
4.9. Aplicación del framework a caso de estudio	65
4.10. Pantalla de inicio de la plataforma de metaverso Virprot	66
4.11. Categoría proyectos	67
4.12. Categoría aula virtual	68
4.13. Categoría marketplace	68
5.1. Framework para diseño modular	75
5.2. Niveles de modularización para proyectos de diseño de plantas de producción	78
5.3. Componentes modulares de objetos	83
5.4. Catálogo de componentes para diseño modular	84
5.5. Componentes para el diseño modular	87
5.6. Ejemplo de sistema de interfaces de usuario y datos	88
5.7. Modelo de colaboración basado en avatar que se implementó en el entorno virtual	89
6.1. Integración de una función basada en monitorización de procesos para Smart Factory en Framework principal.	91
6.2. Relación entre la monitorización y la analítica de datos en Smart Factory.	95
6.3. Representación de la monitorización de una fábrica inteligente que puede ser simulada con realidad virtual	96
6.4. Proceso de monitorización basado en realidad virtual y metaverso dentro de un contexto de Smart Factory	97
6.5. Sistema de componentes de monitorización integrados en el framework de realidad virtual	98
6.6. Implementación de los componentes en el framework	99
6.7. Componentes de visualización e interacción	100
6.8. Sistema de componentes de captura de datos	101
6.9. Distribución de los sistemas de monitorización en la planta de producción.	108
6.10. Proceso general de captura y análisis de datos para sistema de monitorización con realidad virtual	109
6.11. Vinculación de bases de datos entre el software FlexSim y MySQL.	109
6.12. Construcción de bases de datos para monitorización en Power BI.	110
6.13. Construcción de bases de datos para monitorización en Power BI.	111
6.14. Montaje de los dashboards en monitores dentro del caso de estudio	112
7.1. Metodología de pruebas de usabilidad	116
7.2. Pruebas de usabilidad del aplicativo de realidad virtual con participantes.	123
C.1. Diagrama de Proceso de producción de un Automóvil	141

Lista de Tablas

1.1. Productos de investigación de la tesis doctoral	8
3.1. Personajes dentro del aplicativo	41
3.2. Niveles del proyecto Digital Factory Metaverse.	41
3.3. Aplicación de tecnologías de Smart Factory en el caso de estudio.	48
4.1. Estilos de los controles en realidad virtual	56
4.2. Aportes de metaversos a la comunidad científica en los últimos 5 años.	70
4.3. Características del metaverso	72
5.1. Análisis FODA de situación actual de los sistemas modulares.	77
5.2. Clasificación de módulos.	78
6.1. Indicadores de monitorización de equipos y máquinas en Smart Factory.	103
6.2. Indicadores de monitorización de procesos	105
6.3. Indicadores de monitorización de calidad	106
6.4. Indicadores de monitorización de recursos	107
7.1. Aplicación de la metodología de usabilidad	117
7.2. Definición de métricas para experiencia de usuario con realidad virtual.	122
8.1. Productos de investigación de la tesis doctoral	132
C.1. Análisis de productos-cantidades	140
C.2. Secuencia de operaciones y flujos de materiales para el proceso de ensamblaje de los automóviles	140

Introducción

1.1. Motivación y planteamiento del problema

1.1.1. Motivación

Gracias a los avances en la tecnología de simulación por ordenador, hoy en día no solo se pueden desarrollar las características geométricas de un objeto en tres dimensiones, sino también sus características funcionales que permiten predecir y configurar cambios respecto a situaciones reales. Según [1] dentro de la simulación, en el caso del sector industrial se habla de optimizar y analizar en escenarios virtuales el comportamiento en tiempo real de los sistemas de producción mediante tecnologías por ordenador. El proceso comienza mediante la obtención de una réplica de los elementos físicos del producto, proceso o planta de producción real. A continuación, se llevan a cabo pruebas virtuales utilizando esta información, permitiendo la observación y análisis del comportamiento del proceso en diversos escenarios. Asimismo, se realizan predicciones de situaciones y se toman decisiones orientadas a la mejora. Es importante destacar que la simulación puede reflejar de manera precisa la realidad [2].

En la actualidad, los entornos virtuales colaborativos (EVC) en su representación 3D, también llamados mundos virtuales generados por ordenador, han permitido visualizar y simular escenarios que se representan acorde a la vida real. Una tecnología que permite sentir una inmersión casi realista es la realidad virtual, que gracias a sus dispositivos y software, permite vivir la experiencia en primera persona, en donde, dependiendo de la situación, se pueden cambiar, modificar y simular eventos de los objetos presentes en el entorno 3D. La experiencia se vuelve más enriquecedora cuando varios participantes pueden unirse en tiempo real desde cualquier lugar del mundo mediante la función multiusuario. Esto permite colaborar y coordinarse eficazmente en las tareas a realizar.

Los EVC han avanzado de tal manera que existen mundos virtuales con características de colaboración en línea para diferentes ámbitos, como la educación, el trabajo y el entretenimiento [3]. Estos EVC se presentan a través de plataformas en 2D y 3D,

proporcionando una experiencia inmersiva y dinámica para los usuarios, permitiendo una mayor interacción, colaboración y aprendizaje. Los EVC en 3D con realidad virtual están en una etapa temprana de desarrollo. Por ejemplo, Facebook anunció en octubre de 2021 su proyecto llamado “metaverso”, en el cual se busca crear mundos virtuales utilizando realidad virtual, donde los usuarios pueden interactuar y experimentar una sensación de presencia real, independientemente de su ubicación física [4].

Por otra parte, el concepto de metaverso se ha vuelto cada vez más relevante en el ámbito de la comunicación y la colaboración en los últimos años. Se refiere a un espacio virtual compartido en el que las personas pueden interactuar, comunicarse y colaborar de manera similar a como lo hacen en el mundo físico en tiempo real. El metaverso ofrece una amplia gama de posibilidades para la comunicación y la colaboración, ya que permite a los usuarios reunirse, trabajar juntos, compartir información y recursos, y participar en actividades conjuntas, todo dentro de un entorno virtual.

De esta manera, la motivación que ha impulsado a esta investigación radica en el reconocimiento del potencial transformador de la realidad virtual y el metaverso en las prácticas de colaboración en entornos virtuales 3D, con un enfoque particular de aplicación en los sectores de educación y producción, especialmente en los sistemas de producción en el contexto de la *Smart Factory*. Se parte de la premisa de que las características y condiciones del entorno real pueden ser replicadas de manera efectiva en un mundo virtual a través de medios digitales.

Por lo tanto, en esta investigación se propone contribuir al desarrollo de un metaverso desde una primera aproximación, adaptado a las necesidades de colaboración en entornos virtuales 3D, a través del diseño y desarrollo de un *framework* de manera progresiva con funciones especiales enfocados en la modularización y monitorización de sistemas en *Smart Factory* mediante realidad virtual, con ello se busca formalizar y optimizar la colaboración y comunicación, permitiendo una interacción y aprendizaje más efectivos en aplicaciones con realidad virtual.

1.1.2. Planteamiento del problema

La tecnología de realidad virtual es la apertura hacia la industria 4.0 y el camino para que las empresas e instituciones inicien la digitalización en sus sistemas de producción [5]; esta tecnología es poco conocida debido a su reciente desarrollo y comercialización, y algunas empresas ni siquiera conocen o están familiarizadas con los mundos virtuales 3D, el diseño 3D, la simulación y la realidad virtual. De hecho, las empresas esperan visualizar sus entornos utilizando estas tecnologías, pero debido a su desarrollo preliminar y a los costos, no han podido acceder a ellas, especialmente las empresas e instituciones pequeñas.

La colaboración, comunicación e información en tiempo real son importantes, pero pueden presentar problemas y gastos cuando se trata de realizar reuniones, capacitaciones, monitoreo y validación de procesos de forma colaborativa y grupal.

A menudo, las personas deben viajar y reunirse de forma presencial para discutir y resolver situaciones, lo que puede ser costoso y difícil de coordinar.

Las empresas que ya han adoptado tecnologías de *Smart Factory* pueden encontrar dificultades al tratar de optimizar y mejorar sus procesos mediante herramientas tradicionales, ya que esto puede requerir una gran inversión en tiempo y recursos, tanto para capacitar al personal como para adquirir los recursos necesarios para implementar los sistemas, incluyendo los gastos logísticos. Además, esta situación puede generar ineficiencias en los procesos y una reducción en la productividad. Es importante considerar la adopción de nuevas tecnologías o herramientas avanzadas para mejorar la eficiencia y optimizar los procesos en una fábrica inteligente.

Los avances en sistemas de realidad virtual, especialmente con relación al concepto de metaverso, son todavía incipientes y su desarrollo se ve limitado principalmente a usos educativos y comerciales [6]. Pocas empresas en el mundo se enfocan en este tipo de desarrollos. En cuanto a su aplicación en empresas de producción, la realidad virtual todavía no ha sido adecuadamente utilizada para simular, visualizar, reconfigurar, monitorear y analizar en tiempo real los procesos. A pesar de ello, existe un gran potencial en el uso de esta tecnología para mejorar la eficiencia y optimizar los procesos mediante la creación de sistemas de realidad virtual.

La realidad virtual y el metaverso ofrecen una oportunidad única para trascender las limitaciones físicas y geográficas, permitiendo a los participantes reunirse y colaborar en un espacio virtual compartido. Esta capacidad de crear entornos virtuales inmersivos y realistas proporciona una experiencia más rica y envolvente, que fomenta la comunicación efectiva, la interacción fluida y la colaboración activa entre los usuarios.

En el contexto de la *Smart Factory* y la producción industrial, la adopción de tecnologías de realidad virtual y metaverso puede tener un impacto significativo en la eficiencia, la productividad y la seguridad. Los entornos virtuales permiten la simulación de escenarios de producción, el entrenamiento virtual de los empleados y la visualización de datos complejos de manera intuitiva. Esto facilita la toma de decisiones informadas, el aprendizaje práctico y la optimización de los procesos de producción.

Sin embargo, es importante destacar que existen desafíos y limitaciones que deben abordarse para aprovechar plenamente el potencial de la realidad virtual y el metaverso en los entornos colaborativos. Estos incluyen la necesidad de desarrollar *frameworks* y herramientas específicas para la creación y gestión de metaversos, así como la integración adecuada de estas tecnologías en los flujos de trabajo existentes.

1.1.3. Formulación del problema

¿Cómo se puede desarrollar un *framework* de realidad virtual en un entorno de metaverso, que integre diseño modular y monitorización de procesos en *Smart Factory*, y que sea validado mediante pruebas y experimentación colaborativa?

1.2. Justificación

Esta investigación presenta un enfoque innovador basado en la propuesta de desarrollo de un *framework* de sistema de realidad virtual orientado al metaverso. La aplicabilidad de este *framework* puede extenderse a diferentes aplicaciones del sector productivo y educación, es por ello que en esta investigación además del desarrollo se ha realizado una aplicación en un caso de estudio basado en la *Smart Factory*, con un enfoque particular de aplicación en el diseño modular y la monitorización de procesos en colaboración y comunicación en tiempo real.

El sistema de realidad virtual propuesto resuelve varias situaciones actuales que presentan las empresas mediante una simulación controlada por ordenador en entornos virtuales 3D realistas (gemelo digital), centrándose especialmente en actividades como la capacidad de realizar cambios en la producción en tiempo real según las necesidades y los requerimientos de demanda sin afectar la actividad de producción (monitorización de procesos), distribución de planta bajo condiciones especiales de diseño modular que, en una situación real, podrían traer gastos y tiempo. Además, permite la colaboración en tiempo real con personas de la empresa sin importar el lugar donde se encuentren. Tan solo se necesita dispositivos de realidad virtual, conexión a internet y el aplicativo para interactuar.

La realidad virtual posibilita la integración de componentes en entornos inmersivos, lo que permite una interacción cada vez más realista entre el sistema de producción y el usuario. Mediante esta tecnología, el usuario puede sumergirse en una realidad simulada donde puede experimentar y utilizar todos sus sentidos en un entorno interactivo. En consecuencia, las acciones llevadas a cabo en esta simulación virtual se generan como resultado de la interacción con los elementos presentes en este tipo de realidad.

Esta solución proporcionará una amplia capacidad de replicación y adaptación a las necesidades y desafíos específicos de los sistemas de producción en las empresas, brindando las funcionalidades requeridas en cada caso y ajustándose al criterio y ritmo de implementación necesario. Esto permitirá a las organizaciones aprovechar al máximo los beneficios de la realidad virtual y el metaverso, personalizando la solución de acuerdo con sus requisitos particulares y abordando eficazmente sus problemáticas específicas.

En el ámbito educativo, esta solución de realidad virtual orientada al metaverso será de gran valor. Permitirá a las instituciones educativas ofrecer experiencias de aprendizaje inmersivas y enriquecedoras, permitiendo a los estudiantes explorar conceptos abstractos y complejos de manera visual y práctica. A través de la personalización de la solución, las organizaciones educativas podrán adaptarla a sus programas de estudio, diseñando entornos virtuales que se alineen con los objetivos educativos y las necesidades de los estudiantes. Esto impulsará la participación activa de los estudiantes, fomentando el pensamiento crítico, la colaboración y el aprendizaje experiencial. Además, al abordar las problemáticas específicas del ámbito educativo,

como la accesibilidad y la igualdad de oportunidades, esta solución contribuirá a crear entornos de aprendizaje más inclusivos y equitativos, brindando a todos los estudiantes la posibilidad de acceder a experiencias educativas innovadoras y de calidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Proponer una estrategia de desarrollo iterativo de un *framework* de sistema de realidad virtual que permita la incorporación de las funciones de diseño modular y monitorización de procesos en *Smart Factory*, mediante la experimentación colaborativa en un entorno de metaverso.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar un entorno 3D, siguiendo los principios de realidad virtual y metaverso, con el fin de representar de manera inmersiva y realista una planta troncal de *Smart Factory*.
- Desarrollar de forma iterativa un *framework* de sistema de realidad virtual basado en metaverso que permita la colaboración y comunicación efectiva entre los usuarios en el entorno virtual 3D, mediante la incorporación de las funciones de diseño modular y monitorización.
- Validar de manera integral el sistema completo de realidad virtual, enfocándose en la colaboración, comunicación, modularidad y monitorización dentro del entorno de metaverso, a través de pruebas y experimentación colaborativa.

Preguntas de investigación

¿Cómo se puede diseñar un entorno 3D que cumpla con los principios de realidad virtual y metaverso, y que proporcione una representación inmersiva y realista de una planta troncal de *Smart Factory*?

¿Cómo se puede desarrollar de manera iterativa un *framework* de sistema de realidad virtual basado en metaverso que facilite la colaboración y comunicación efectiva entre los usuarios en un entorno virtual 3D, a través de la implementación de funciones de diseño modular y monitorización?

¿Cuál es la efectividad del sistema completo de realidad virtual, incluyendo aspectos de colaboración, comunicación, modularidad y monitorización, dentro del entorno de metaverso, y cómo se puede validar mediante pruebas y experimentación colaborativa?

1.4. Originalidad y contribución de la Investigación

La propuesta de investigación se basa en el desarrollo de un *framework* de realidad virtual para sistemas de diseño modular y monitorización, con un enfoque en el metaverso. Esta propuesta ha sido elaborada siguiendo una estructura progresiva que integra funciones y componentes adecuados para el funcionamiento de un sistema colaborativo y de comunicación en tiempo real.

1.4.1. Originalidad

En la literatura revisada en esta investigación, el modelo de *framework* propuesto para el sistema de realidad virtual proporciona una base práctica para la investigación empírica en gráficos por ordenador y el desarrollo de modelos virtuales 3D. Hasta la fecha, los estudios de investigación centrados en este tema [7], [8], [9], [10], [11] han propuesto investigaciones en diversas áreas relacionadas con los mundos virtuales 3D.

No obstante, es importante tener en cuenta que estos mundos virtuales pueden no estar diseñados específicamente para su uso en todas las áreas y, por lo tanto, pueden carecer de relevancia en algunos casos. Además, se ha identificado que el costo de implementación en plataformas web puede ser demasiado elevado.

Por lo tanto, la propuesta de este *framework* se destaca por abordar estas limitaciones y proporcionar una solución práctica y versátil para la creación y desarrollo de entornos virtuales. Su enfoque progresivo permite la integración de nuevas funcionalidades adaptadas a las necesidades específicas de cada proyecto, lo que lo convierte en una herramienta prometedora para la investigación y la aplicación práctica en diversas disciplinas.

1.4.2. Contribuciones de esta tesis

La presente tesis doctoral ofrece importantes contribuciones en el campo de la realidad virtual, el metaverso, el diseño modular y la monitorización en entornos de *Smart Factory*. A través de los resultados obtenidos, estas contribuciones mejoran y amplían el conocimiento existente en estos temas, y pueden tener implicaciones significativas para el desarrollo de futuras investigaciones en el campo de la realidad virtual.

A continuación, se detallan los principales aportes realizados:

- Propuesta de desarrollo de un *framework* de realidad virtual de forma iterativa.
- Desarrollo de un sistema de componentes para diseño 3D en realidad virtual.
- Estudio de tecnologías de la *Smart Factory* y su aplicación con la realidad virtual.
- Desarrollo de un sistema multijugador basado en metaverso para colaboración y comunicación.
- Desarrollo de un sistema de configuración modular para diseño de instalaciones industriales.
- Desarrollo de un sistema de monitorización de procesos basado en *Smart Factory*.

En la Figura 1.1 se puede detallar las contribuciones de la investigación basadas en la propuesta de desarrollo de un *framework* de realidad virtual que funciona con un sistema integrado de funciones para una adecuada experiencia de usuario:

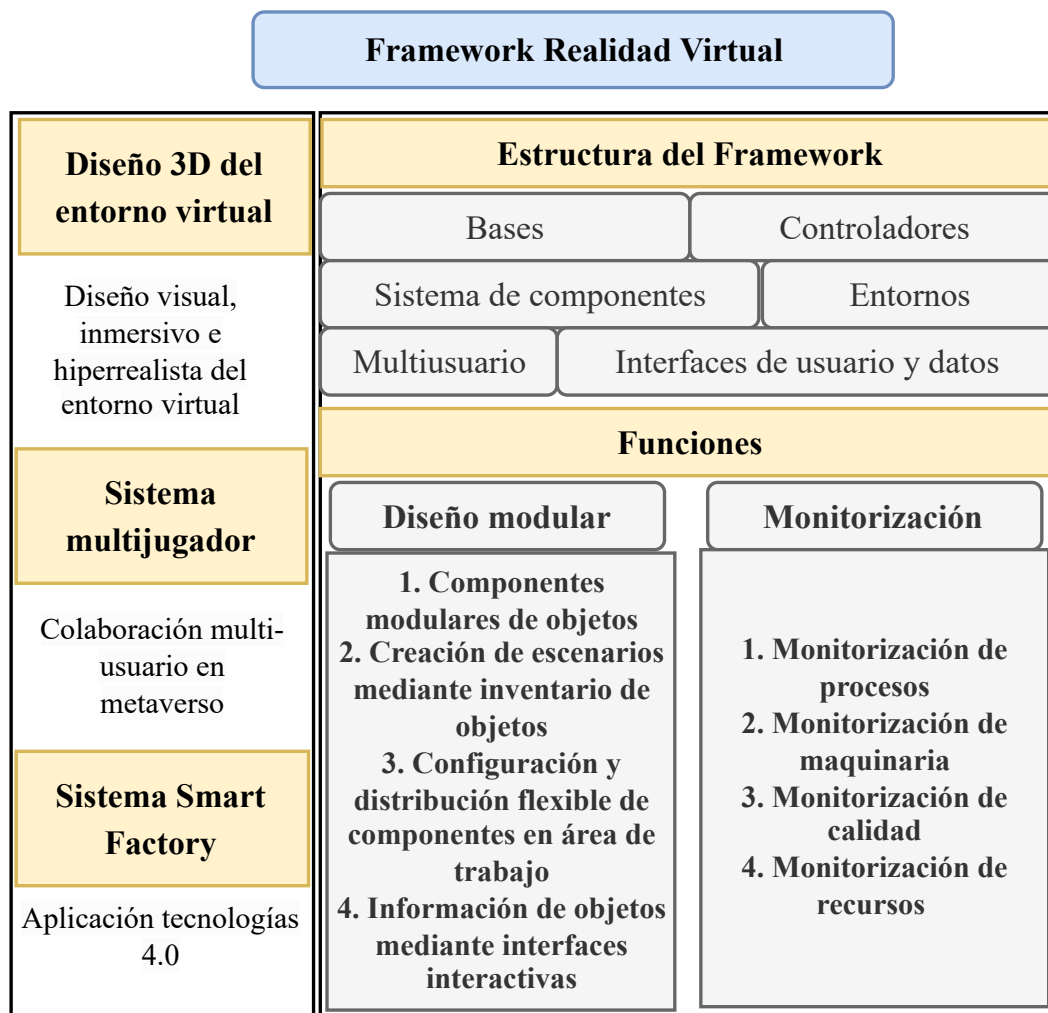


FIGURA 1.1: Contribuciones de la investigación.

Productos de investigación

Los productos de investigación resultados de la tesis se han publicado en revistas de alto impacto para la comunidad científica. La Tabla 8.1 resume los productos obtenidos de la investigación:

Contribuciones	Producto/Actividad
<p><i>Contribuciones de investigación:</i> Propuesta de una metodología para el diseño de plantas de producción a pequeña escala en <i>Smart Factory</i>, este aporte permite a los diseñadores de instalaciones industriales seguir una serie de pasos adaptados bajo el concepto modular y de Industria 4.0 para diseñar adecuadamente la distribución de planta.</p>	<p>Publicación artículo de revista</p> <p>L. O. Alpala et al. <i>Methodology for the design and simulation of industrial facilities and production systems based on a modular approach in an industry 4.0 context</i>. <i>Dyna</i>, 2018, vol. 85, no 207, p. 243-252. https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.68545</p>
<p><i>Contribuciones de investigación:</i> Desarrollo de un <i>Framework</i> de sistema de realidad virtual mediante el enfoque de metaverso. Este sistema permite a los usuarios aprender y practicar habilidades y técnicas en un entorno de realidad virtual, mejorando su preparación para trabajar en una fábrica inteligente.</p>	<p>Publicación artículo de revista</p> <p>L. O. Alpala et al. <i>Smart Factory using virtual reality and online multi-user: Towards a metaverse for experimental Frameworks</i>. <i>Applied Sciences</i>, 2022, vol. 12, no 12, p. 6258. https://doi.org/10.3390/app12126258</p>

TABLA 1.1: Productos de investigación de la tesis doctoral.

1.5. Estructura de la tesis

La estructura de esta tesis doctoral consta de siete capítulos, además de una sección de bibliografía y apéndices. A continuación, se describe con mayor detalle el contenido de cada uno de ellos.

En el Capítulo 1, se ha descrito la problemática, justificación, objetivos y contribuciones de la tesis. En el Capítulo 2, se expone los antecedentes de los principales temas abordados en esta tesis. Para ello, se aborda las contribuciones más recientes sobre: Entornos virtuales colaborativos 3D, realidad virtual y metaverso, la Smart Factory en Industria 4.0, diseño modular y colaborativo en realidad virtual y monitorización en Smart Factory basado en realidad virtual. En el Capítulo 3, se presenta una primera aproximación al desarrollo de un *framework* de realidad virtual basado en el diseño 3D de entornos virtuales. Aquí se desarrolla todo el modelo 3D del caso de estudio presentado en esta investigación. El Capítulo 4 presenta el desarrollo de un sistema de realidad virtual bajo un *framework* con enfoque de metaverso. En el Capítulo 5, se presenta una propuesta de Integración de una función basada en diseño modular para Smart Factory en el *framework* principal de realidad virtual y metaverso. En el Capítulo 6, se presenta una propuesta de integración de una función basada en monitorización de procesos para Smart Factory en el *framework* principal de realidad virtual y metaverso. En el Capítulo 7 se presenta la evaluación de la propuesta mediante pruebas de usabilidad con usuarios. Finalmente, en el Capítulo 8, se presentan las conclusiones y trabajos futuros de la investigación.

Antecedentes

La tesis tiene como objetivo unir los campos del trabajo colaborativo, el aprendizaje y la comunicación colaborativa mediante el uso de la realidad virtual y el metaverso. Se investiga cómo las plataformas de comunicación en mundos virtuales pueden contribuir a la gestión del conocimiento y la educación, y cómo esto se relaciona con disciplinas como sistemas de información, interacción humano-computadora y diseño asistido por computadora.

En este capítulo, se presentan las contribuciones de varios investigadores en áreas relevantes de la realidad virtual en el contexto del metaverso. Además, se explora cómo se puede diseñar y desarrollar un sistema de realidad virtual enfocado en el metaverso para mejorar la comunicación y la colaboración en tiempo real a través de mundos virtuales.

La Figura 2.1 presenta un resumen de las áreas de investigación presentadas para esta tesis en los últimos años en lo que se refiere a los antecedentes.

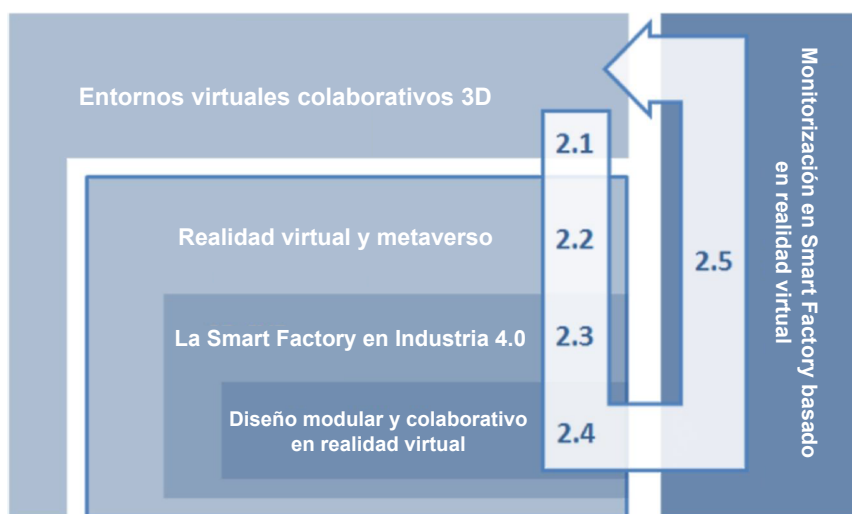


FIGURA 2.1: Representación de metodología de áreas de investigación para la tesis doctoral.

Según se muestra en la Figura 2.1, la interrelación de todas las áreas de investigación conforma un proyecto completo. En este sentido, el proyecto comienza con una introducción a los entornos virtuales colaborativos en 3D en la sección 2.1, aquí se realiza un análisis de características, inmersión y presencia y tipos de EVC 3D; luego, en la sección 2.2 se trata los sistemas de realidad virtual y metaverso, su enfoque, diseño y desarrollo de entornos virtuales colaborativos, plataformas y la investigación actual sobre estos temas con aplicaciones en diferentes sectores y en especial la de *Smart Factory*. La sección 2.3 estudia los conceptos y aplicación de la *Smart Factory* en la Industria 4.0. La sección 2.4 presenta como una disciplina de diseño modular y colaborativo en realidad virtual, es el vínculo emergente lógico entre un sistema de soporte de colaboración y su dominio de aplicación, aquí se estudia el diseño modular y su aplicación en el diseño y configuración en sistemas de producción. La sección 2.5 estudia la monitorización en *Smart Factory* basado en realidad virtual, y aplicación a sistemas productivos, utilizando la monitorización y analítica de datos para procesos en plantas de producción, y finalmente la sección 2.6 presenta una síntesis del Capítulo.

2.1. Entornos virtuales colaborativos 3D

Para aclarar la base teórica y los antecedentes en los que se basa esta tesis, es necesario examinar el campo de la colaboración en los mundos virtuales en el contexto de la realidad virtual, el metaverso y la *Smart Factory*.

Esta tesis doctoral se centra en los mundos virtuales 3D frente a los sistemas realidad virtual en enfoque metaverso y colaboración multiusuario, una decisión que se tomó por las siguientes dos razones: Se cree ampliamente que el principal beneficio de utilizar entornos virtuales 3D es la posibilidad de tener reuniones de equipo instantáneas sin necesidad de viajar. En segundo lugar, es probable que la colaboración dentro y entre empresas y otras instituciones no tenga lugar en centros de realidad virtual inmersiva (debido a la disponibilidad, accesibilidad, costos, complejidad y necesidad constante de personal técnico), por tanto, estas soluciones permitirían que se tenga más acceso a la comunicación y participación con pocos recursos.

A continuación, se realiza un estudio de los principales antecedentes relacionados con el tema de Entornos Virtuales Colaborativos 3D.

2.1.1. Características de los entornos virtuales colaborativos 3D

Los entornos virtuales colaborativos 3D son entornos en los que varios usuarios pueden colaborar y compartir información en tiempo real en un entorno tridimensional. Estos entornos pueden ofrecer una amplia variedad de características y funcionalidades, algunas de las características más comunes incluyen:

- *Interfaz gráfica de usuario en 3D*: permite a los usuarios interactuar con el entorno y los objetos en él de manera natural e intuitiva.

- *Herramientas de colaboración*: permiten a los usuarios compartir información, trabajar en conjunto en proyectos y comunicarse de manera eficiente en el entorno virtual.
- *Personalización*: permite a los usuarios cambiar y personalizar la apariencia y la disposición del entorno virtual, así como la configuración de las herramientas y funcionalidades disponibles.
- *Realismo y detalle*: los entornos virtuales colaborativos 3D suelen ofrecer un alto grado de realismo y detalle en la representación de los objetos y el entorno, lo que permite a los usuarios experimentar una sensación de inmersión en el entorno virtual.
- *Compatibilidad con dispositivos y plataformas*: los entornos virtuales colaborativos 3D suelen ser compatibles con una amplia variedad de dispositivos y plataformas, lo que permite a los usuarios acceder y utilizar el entorno desde diferentes dispositivos y plataformas.

Actualmente, se observa que las definiciones formales de los mundos virtuales y los conceptos relacionados aún se encuentran en una etapa incipiente y poco desarrollada en general. Es necesario avanzar en su comprensión para poder explotar plenamente el potencial de estas tecnologías emergentes. Sin embargo, a medida que las plataformas de juegos multijugador se vuelvan cada vez más robustas y realistas, inevitablemente se usarán para algo más que contar historias y entretener [12].

En un futuro cercano, se adoptarán plataformas de mundos virtuales para el comercio, la educación, la industria, la formación profesional en instituciones de educación, militar y vocacional, la consulta médica y la psicología, etc. Aunque la mayoría de los mundos virtuales de hoy en día son una consecuencia de la industria del juego, con el tiempo se convertirán en mucho más que eso y su enfoque estará para la educación y la empresa [13].

- *Avatares*

Los avatares son representaciones digitales de una persona en un mundo virtual [14]. En la realidad virtual, permiten a las personas interactuar y experimentar un mundo de manera más inmersiva [15]. Según [16], los avatares pueden ser controlados mediante controles de movimiento o voz, y pueden personalizarse con apariencia y características para reflejar la identidad de la persona que los controla.

En el metaverso, los avatares son aún más importantes, ya que las personas los utilizan para representarse y comunicarse con otros usuarios en un mundo virtual [17]. Además, de acuerdo a [14], los avatares en el metaverso pueden adquirir habilidades y conocimientos de la persona que los controla, y ser utilizados para crear y manipular contenido de manera similar a como lo harían en la vida real.

- *Entorno virtual Configurable*

Un entorno configurable en un entorno virtual colaborativo permite a los usuarios cambiar y personalizar las diferentes características y opciones disponibles en el entorno virtual [18]. Esto puede incluir la configuración del diseño y la disposición de la interfaz

gráfica de usuario, así como la configuración de las herramientas y funcionalidades disponibles en el entorno.

La configuración de un entorno virtual colaborativo puede ser de gran ayuda para mejorar la comunicación y la colaboración entre los usuarios, como se destaca en [19]. Por ejemplo, la personalización de la disposición de las herramientas en la interfaz gráfica de usuario podría facilitar la visualización y el acceso a la información relevante para el trabajo en equipo. Además, un entorno virtual configurable podría permitir la adaptación de las herramientas y funcionalidades disponibles a las necesidades específicas de cada proyecto o equipo de trabajo.

2.1.2. Inmersión y presencia en entornos virtuales colaborativos

La inmersión y la presencia son términos relacionados que se utilizan a menudo en el contexto de la realidad virtual, según [20] la inmersión se refiere a la sensación de estar completamente envuelto en un mundo virtual y olvidar la realidad física circundante. La presencia, por otro lado, se refiere a la sensación de estar presente en un mundo virtual y experimentar la sensación de estar allí de manera similar a como lo haría en la vida real [21].

Para [22] la inmersión y la presencia son importantes en la realidad virtual porque ayudan a crear una experiencia más realista y enriquecedora. La tecnología de realidad virtual se está desarrollando constantemente para mejorar la inmersión y la presencia, mediante el uso de dispositivos de realidad virtual más avanzados, como gafas de realidad virtual con una resolución más alta y sensores que registran los movimientos de la cabeza y las manos de las personas.

Además, la inmersión y la presencia también se están utilizando en otros campos, como la educación y el entretenimiento, para mejorar la experiencia del usuario y hacerla más enriquecedora.

2.1.3. Tipos de entornos virtuales colaborativos 3D en realidad virtual

Los entornos virtuales colaborativos 3D en realidad virtual permiten a varios usuarios colaborar y compartir información en tiempo real en un entorno tridimensional, utilizando dispositivos de realidad virtual. Según [18], estos entornos ofrecen una experiencia de inmersión y realismo más intensos que los entornos virtuales colaborativos tradicionales, ya que permiten a los usuarios interactuar de forma más natural y sentirse realmente presentes en el entorno virtual.

Estos entornos suelen contar con herramientas y funcionalidades que facilitan la comunicación y colaboración entre los usuarios, como chat en tiempo real, edición colaborativa y compartición de archivos. Además, ofrecen una interfaz gráfica de usuario en 3D que permite a los usuarios interactuar de manera natural e intuitiva con el entorno y los objetos presentes en él.

El estudio realizado por [19] demuestra que los entornos virtuales colaborativos 3D son una forma eficiente y flexible de trabajar en equipo y compartir información de

manera rápida y sencilla. Estos entornos permiten a los usuarios colaborar y comunicarse desde cualquier lugar y en cualquier momento, brindando una experiencia de inmersión y realismo más intensos que los entornos virtuales colaborativos tradicionales.

Existen diversos tipos de entornos virtuales colaborativos 3D en realidad virtual, los cuales varían según su aplicación o uso, tal como señala [23]. Algunos ejemplos de estos entornos incluyen:

- *Entornos virtuales colaborativos 3D para el aprendizaje en línea*: estos entornos permiten a los estudiantes y profesores colaborar y compartir información en tiempo real en un entorno virtual en 3D. Pueden incluir herramientas y funcionalidades que facilitan el aprendizaje en línea, como foros de discusión, herramientas de evaluación o recursos educativos en 3D.
- *Entornos virtuales colaborativos 3D para la colaboración en proyectos de trabajo en equipo*: estos entornos permiten a los miembros de un equipo colaborar y compartir información en tiempo real en un entorno virtual en 3D. Pueden incluir herramientas y funcionalidades que facilitan el trabajo en equipo, como herramientas de edición colaborativa, chat en tiempo real o compartición de archivos.
- *Entornos virtuales colaborativos 3D para la comunicación entre miembros de una organización*: estos entornos permiten a los miembros de una organización colaborar y compartir información en tiempo real en un entorno virtual en 3D. Pueden incluir herramientas y funcionalidades que facilitan la comunicación y colaboración entre los miembros de la organización, como salas de reunión virtuales, herramientas de votación o presentaciones en 3D.

2.2. Realidad virtual y metaverso

La realidad virtual es una tecnología que permite a los usuarios experimentar e interactuar con un mundo virtual mediante el uso de dispositivos de realidad virtual. Estos dispositivos suelen incluir un casco o gafas que cubren los ojos y oídos del usuario, y guantes o controles que permiten al usuario interactuar con el mundo virtual. La realidad virtual se utiliza comúnmente en videojuegos y en entrenamientos y simulaciones de diversas industrias [24].

Por otro lado, el metaverso es un concepto teórico que se refiere a una red de mundos virtuales interconectados, los cuales forman un universo virtual compartido. La idea del metaverso ha sido desarrollada en la cultura popular a través de la ciencia ficción y se ha relacionado con la realidad virtual y la inteligencia artificial. En la industria 4.0, el metaverso podría utilizarse como una plataforma para la colaboración en tiempo real entre personas de diferentes lugares del mundo, así como para la creación y comercialización de productos y servicios virtuales [25].

A medida que la realidad virtual y el metaverso evolucionan, su impacto en la industria 4.0 es cada vez más evidente, según señala [26]. Con el tiempo, es probable

que estas tecnologías emergentes encuentren un mayor uso en diversas aplicaciones industriales.

2.2.1. Antecedentes de realidad virtual y metaverso

En la literatura, la realidad virtual se está aplicando a diferentes campos, como la medicina, la ingeniería, la arquitectura, el diseño, etc., y los desarrolladores están logrando cada vez más nuevas funciones emergentes para integrarlas dentro del sistema de realidad virtual [27], aunque en su mayor parte, solo como primeras aproximaciones. Aunque aún es demasiado temprano para una aplicación masiva y generalizada en la Industria 4.0 y la fábrica inteligente, autores como los de [15] han demostrado que este campo tiene un gran potencial de desarrollo en los próximos años, especialmente en el ámbito de la manufactura y la educación.

Otros trabajos notables a destacar, reportados en la literatura con respecto a este tema, se puede mencionar en [28] se desarrolla modelos tridimensionales de sistemas de producción para fábricas utilizando la RV, en estos muestran recorridos virtuales, escenarios de interacción con objetos, estudios de ergonomía de personal de planta y capacitaciones sobre procesos en específico, la realidad virtuales es un tema que se estudia, pero no profundiza especialmente en la analítica de datos.

Según [29], el término metaverso o “metauniverso” se originó en la novela de Neal Stephenson de 1992, “Snow Crash”. Se refiere a espacios virtuales tridimensionales que representan copias digitales del mundo real, y también puede hacer alusión a las experiencias multidimensionales en Internet, abarcando desde la web 2.0, tecnologías 3D, realidad virtual y realidad aumentada [6]. Los metaversos son entornos virtuales en los que los usuarios interactúan a través de avatares, sin restricciones económicas o sociales. Permiten la exploración de diferentes realidades, la interacción social y la creación y compartición de contenido. Los metaversos representan una nueva oportunidad para expandir nuestra comprensión de lo que es posible en un entorno virtual [30].

A partir de mediados de los años setenta, comenzaron a surgir los primeros juegos que se destacaban por presentar aventuras de texto en mundos virtuales, tales como los MUD. A medida que Internet se popularizó, se desarrollaron mundos virtuales digitales que permitían a los usuarios experimentar otras vidas de manera virtual. Según [15], en 1996 surgieron los primeros prototipos, como el Tamagotchi, que presentaban una vida virtual digital y requerían cuidados para sobrevivir.

El pionero que elaboró este concepto fue *Acceleration Studies Foundation* (ASF), que cobró mayor protagonismo cuando NVIDIA anunció su plataforma de simulación en tiempo real *Omniiverse* para producción 3D en 2020 como una alternativa de próxima generación. Asimismo, Roblox en la plataforma de juegos Fortnite expuso el video de la coreografía de Dynamite, mientras que Black Pink colocó en el mercado el video del avatar Ice Cream 3D en Zepeto [31]. En 2021, la empresa Meta (anteriormente conocida como Facebook) anunció la creación de un metaverso a gran escala con realidad virtual en su plataforma “Horizon Worlds”, con el fin de conectar a sus usuarios a través

de internet en reuniones, capacitaciones y recorridos virtuales, según lo informado por [3]. La aplicación del metaverso ya se está realizando, como lo destacan trabajos en la literatura, como en [28], donde se aplicó el metaverso junto con la realidad virtual en la enseñanza; en [29], donde los autores abordan la colaboración del personal en entornos virtuales 3D; y en [18], donde se exploró un enfoque de realidad mixta en los espacios de comunicación. En cuanto a las propuestas de *Frameworks*, las experiencias de realidad virtual en realidad virtual y metaverso se introdujeron en [9-11, 32-34].

2.2.2. Plataformas de desarrollo de aplicativos de realidad virtual

El término “plataforma de mundo virtual” hace referencia a todos los componentes de software que permiten a los usuarios acceder a un mundo virtual desde sus computadoras [35]. Normalmente, para el usuario, solo la aplicación cliente es relevante, ya que debe ser instalada en su computadora. En [36] indica que el proveedor del mundo virtual es responsable de gestionar los servidores en línea en los que se ejecuta la aplicación del servidor y la base de datos global que la respalda. Algunas plataformas ofrecen una alternativa que no requiere que los usuarios instalen una aplicación en sus computadoras, sino que proporcionan un programa más pequeño que se descarga, se instala y se ejecuta dentro de un navegador web.

Las plataformas de desarrollo de aplicaciones de realidad virtual son herramientas que permiten a los desarrolladores crear y desarrollar aplicaciones de realidad virtual; Algunas de las plataformas más populares incluyen Unity, Unreal Engine y CryEngine [37]. Estas plataformas ofrecen una amplia variedad de herramientas y recursos que permiten a los desarrolladores crear y desarrollar aplicaciones de realidad virtual de alta calidad. Además, también ofrecen soporte para diferentes dispositivos y plataformas, lo que permite a los desarrolladores crear aplicaciones de realidad virtual que se ejecuten en una amplia variedad de dispositivos y plataformas.

Estas plataformas ofrecen herramientas y recursos especializados para el desarrollo de aplicaciones de realidad virtual de alta calidad. Por otro lado, software de simulación como FlexSim, utilizado en diversas industrias, también cuenta con integración de realidad virtual. Según [38] permite a los usuarios crear modelos virtuales en 3D y simular sistemas complejos en tiempo real. La capacidad de FlexSim para simular el comportamiento de los sistemas y su integración con la realidad virtual ofrecen una experiencia más inmersiva, lo que facilita la comprensión y optimización de los procesos simulados.

Aunque FlexSim brinda ventajas en términos de simulación en tiempo real y visualización de sistemas complejos, tiene algunas limitaciones en comparación con las plataformas especializadas de desarrollo de aplicaciones de realidad virtual. Estas últimas ofrecen una amplia gama de herramientas y recursos diseñados específicamente para crear experiencias completas y sofisticadas de realidad virtual [39]. Por lo tanto, si el enfoque principal es el desarrollo de aplicaciones de realidad virtual, es más recomendable utilizar plataformas como Unity, Unreal Engine y CryEngine.

Estas plataformas brindan una mayor funcionalidad y están más centradas en ofrecer una experiencia envolvente y realista en comparación con FlexSim, que se enfoca principalmente en la simulación y el análisis de sistemas complejos.

Según [37], algunas plataformas tienen como finalidad obtener beneficios económicos mediante el cobro de una tarifa mensual a sus usuarios por el acceso a su mundo virtual o por la creación e importación de objetos, mientras que otras plataformas son de acceso gratuito. En general, estas últimas suelen basarse en el uso de código abierto.

2.2.3. Investigación en y sobre mundos virtuales con realidad virtual

La investigación en y sobre mundos virtuales con realidad virtual se centra en el uso de tecnología de realidad virtual para crear y estudiar mundos virtuales. Esto puede incluir el uso de simuladores de realidad virtual para recrear situaciones reales en un entorno virtual, así como el desarrollo de nuevas tecnologías y metodologías para mejorar la calidad y la inmersión en estos mundos virtuales [15]. La investigación en este campo también puede abarcar el estudio de cómo los seres humanos interactúan con estos mundos virtuales y cómo pueden ser utilizados para fines educativos, de entrenamiento y de entretenimiento.

Hay un creciente cuerpo de literatura sobre mundos virtuales, con los trabajos más importantes investigando su economía, la cultura que emerge en ellos, y discutiendo nuevos enfoques para su diseño y desarrollo, brindando enfoques y orientación para diseñar tareas y entornos de aprendizaje inmersivos en diferentes áreas [28].

Hasta el momento, existen pocos estudios que se han enfocado en la mecánica de los sistemas de interacción social en entornos de realidad virtual y metaversos [40]. Es solo en los últimos años que se llevan a cabo algunos estudios, por ejemplo, en [41] investigan las interacciones de jugador a jugador en un mundo virtual; [42] examinan experimentalmente la colaboración en Second Life; [43] comparan tareas de colaboración (resolver diferentes tipos de acertijos) en un entorno de mundo virtual a una selección de otros medios de colaboración que incluyen chat de texto y voz, colaboración a través de un sitio web y un entorno cara a cara.

En cuanto a investigaciones, en la que se está aplicando estos temas en los últimos años basadas en la realidad virtual, se pueden destacar las siguientes:

- *Investigación en la interacción en mundos virtuales con realidad virtual*: La investigación en la interacción en mundos virtuales con realidad virtual ha demostrado la importancia de diseñar interfaces intuitivas y naturales que permitan a los usuarios interactuar de manera efectiva con los entornos virtuales [44].
- *Estudio sobre la presencia y la inmersión en mundos virtuales con realidad virtual*: La investigación ha explorado los efectos de la presencia y la inmersión en mundos virtuales con realidad virtual, revelando cómo estos factores pueden influir en la experiencia del usuario y en la efectividad de la formación y la educación virtual [45].

- *Investigación sobre la aplicación de mundos virtuales con realidad virtual en la educación:* La investigación ha examinado el potencial de los mundos virtuales con realidad virtual como entornos educativos, mostrando cómo pueden mejorar la participación, la motivación y el aprendizaje de los estudiantes en diversas áreas de conocimiento [46].
- *Estudio sobre la simulación y la formación en mundos virtuales con realidad virtual:* La investigación ha demostrado el valor de la simulación y la formación en mundos virtuales con realidad virtual, brindando a los usuarios la oportunidad de practicar habilidades y adquirir experiencia en entornos controlados y realistas [47].
- *Investigación sobre la usabilidad y la experiencia del usuario en mundos virtuales con realidad virtual:* La investigación se ha centrado en evaluar la usabilidad y la experiencia del usuario en mundos virtuales con realidad virtual, con el fin de mejorar el diseño y la interacción en estos entornos [48].

2.3. La Smart Factory en Industria 4.0

2.3.1. Cuarta revolución industrial - I4.0

La primera revolución industrial (1784) surgió por el auge de la máquina de vapor, que fue la que aumentó la producción industrial. En la segunda revolución industrial (1870) el motor de combustión y la electricidad fueron la base fundamental. En la tercera revolución industrial, las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) han llegado a ser el pilar fundamental de la misma, surgidas en las décadas de 1960 y 1970. Ahora la cuarta revolución industrial toma como base los ordenadores e internet [49], las máquinas, la automatización, la sistematización y el procesamiento de datos y los integra con los elementos del contexto físico en un ciberespacio [50]. Sin embargo, aún está en proceso de desarrollo y sigue manifestándose como paradigma de los procesos productivos de la economía, las empresas y los países [51].

Una revisión bibliográfica sobre este tema considera que las tecnologías I4.0 son: Internet de las Cosas (IoT), los sistemas ciberfísicos (CPS), Big Data, las etiquetas de radiofrecuencias (RFID), la interfaz hombre-máquina (HMI), el sistema de ejecución de fabricación (MES), la realidad aumentada, la realidad virtual, la simulación, la robótica colaborativa, la inteligencia artificial (IA), la computación en la nube, los gemelos digitales, los entornos virtuales inmersivos en 3D, la fabricación aditiva 3D, la ciberseguridad, las redes de sensores inalámbricos y los drones [52].

La aplicación de la I4.0 a través de tecnologías virtuales como la simulación y la realidad virtual han permitido explorar aplicaciones complejas de automatización e información que pueden integrarse en las empresas. En [52] se propone un sistema de formación de operarios basado en I4.0 y realidad virtual, mientras que en [50] se diseña un laboratorio I4.0 basado en sistemas virtuales y simulación informática, dando una aproximación al funcionamiento de una fábrica inteligente mediante tecnologías de la información. Además, en [36], los autores presentan los aspectos tecnológicos de la

realidad virtual interesantes con el fin de ayudar a desarrolladores de entornos de realidad virtual y crear ambientes virtuales basados en I4.0 y así simular comportamientos reales de máquinas y procesos mediante la ayuda de un ordenador.

2.3.2. Smart Factory

El concepto de *Smart Factory* o fábrica inteligente surgió a finales de la década de 1980 con la inteligencia artificial como una herramienta de fabricación [53]. La *Smart Factory* facilita la producción rápida y dinámica de productos de forma estable que responden a la demanda de artículos personalizados, optimizando el tiempo, el suministro y las redes de producción. En la actualidad, se reconoce que la transformación digital es fundamental para la competitividad de las empresas y se espera que lo siga siendo en el futuro. En los últimos dos años, a raíz de la pandemia mundial, se han producido cambios en las cadenas de suministro debido a la escasez de mano de obra. Por ello, las empresas han continuado compitiendo mediante la adopción de tecnologías como la inteligencia artificial y la ciberseguridad. Otra tecnología clave dentro del contexto de *Smart Factory*, son la de los robots móviles autónomos que, mediante la automatización de actividades repetitivas, mejoran la eficiencia de la fábrica [54]. La integración de estas innovaciones con la interacción humana dará lugar a una transformación empresarial.

Entre las aplicaciones que algunos autores han realizado integrando el contexto de *Smart Factory* con ambientes virtuales, destacan las de [36] que realiza una aplicación de sistemas productivos para el entrenamiento, utilizando la realidad virtual, esta investigación se centra especialmente en el entrenamiento para un único usuario. En [53], realizaron un laboratorio especializado en el contexto de *Smart Factory* utilizando realidad virtual para aprender el entorno de hombre-máquina. Además, en [55], estudiaron la evolución de productos inteligentes dentro de una *Smart Factory* utilizando realidad virtual para visualizar características y funcionalidades.

2.4. Diseño modular y colaborativo en realidad virtual

Según [56] el diseño modular se refiere a la práctica de diseñar sistemas, productos o edificios dividiéndolos en unidades separadas o módulos que pueden ser ensamblados o combinados de diferentes maneras para crear diferentes configuraciones o diseños. Esto permite una mayor flexibilidad y personalización en el diseño, ya que las diferentes unidades o módulos pueden combinarse de diferentes maneras para crear diferentes diseños.

Por otra parte, según [57] la realidad virtual se refiere a la tecnología que permite a las personas experimentar un mundo virtual que simula la realidad. Esto se logra mediante el uso de dispositivos de realidad virtual, como gafas de realidad virtual o dispositivos de mano, que permiten a las personas ver, oír e interactuar con un mundo virtual en tiempo real.

Según [13] el diseño modular con realidad virtual se refiere a la práctica de utilizar la tecnología de realidad virtual para diseñar sistemas, productos o edificios utilizando un enfoque modular. Esto permite a los diseñadores visualizar y probar diferentes configuraciones o diseños de manera más rápida y eficiente, ya que no es necesario construir prototipos físicos para cada diseño. Además, la realidad virtual también puede permitir a los usuarios interactuar y experimentar el diseño de manera más inmersiva y realista.

El diseño de mundos virtuales es una parte importante del desarrollo de aplicaciones de realidad virtual. Los diseñadores de mundos virtuales trabajan en estrecha colaboración con los programadores y otros profesionales para crear experiencias de realidad virtual inmersivas y emocionantes para los usuarios [14].

2.4.1. Diseño modular en Industria 4.0

La Industria 4.0 se refiere a la cuarta revolución industrial, que se caracteriza por la integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, la automatización y la conectividad en la fabricación y la producción de bienes y servicios. Uno de los principios clave de la Industria 4.0 es la flexibilidad y la personalización, y el diseño modular es un enfoque que se adapta bien a estos principios [50].

El diseño modular en la Industria 4.0 se refiere a la práctica de diseñar sistemas, productos o edificios dividiéndolos en unidades separadas o módulos que pueden ser ensamblados o combinados de diferentes maneras para crear diferentes configuraciones o diseños [50]. Esto permite una mayor flexibilidad y personalización en el diseño, ya que las diferentes unidades o módulos pueden combinarse de diferentes maneras para crear diferentes diseños.

En la Industria 4.0, el diseño modular también se combina con tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial y la automatización para mejorar la eficiencia y la precisión en el diseño y la producción [58]. Esto permite a las empresas producir productos personalizados y a medida en un plazo más corto y a un costo más bajo. La cuarta revolución industrial es un cambio fundamental en la forma en que se concibe la producción y la manufactura [51]. Esto implica no solo tecnología y automatización, sino también nuevos modelos de negocio, eficiencia operativa y una mejor relación con el cliente y el personal de planta. En este nuevo paradigma, los centros de producción ya no se enfocarán en producir piezas y productos estandarizados, sino que se centrarán en productos personalizados. Se estima que en los próximos años todas las empresas automatizarán sus sistemas de producción con tecnologías de alta gama, basadas en inteligencia artificial, análisis de datos, sistemas virtuales y configuración modular de procesos en tiempo real [59].

Los conceptos de plantas de producción modulares representan una prometedora opción para mejorar la competitividad y flexibilidad en la producción, especialmente en el ámbito de pequeñas y medianas empresas [60]. Expertos de diversas industrias coinciden en que estos conceptos tienen un gran potencial económico. Sin embargo, en

la actualidad existe una falta de estandarización en el diseño y creación de módulos a nivel de máquinas y equipos, así como en el diseño de plantas de producción completas. Esta situación presenta un desafío para su implementación efectiva en la industria, por lo que es necesario abordar la estandarización de estos conceptos para optimizar su aprovechamiento en el mercado.

Un estudio reciente realizado por [61] indica que, aunque algunos procesos industriales ya han incorporado los sistemas modulares, aún existe una falta de estandarización en el diseño y creación de módulos para máquinas, equipos y plantas completas, lo que limita su adopción a gran escala. Para lograr una planificación efectiva del diseño de plantas modulares, es importante que los módulos estén disponibles en el mercado y sean fácilmente adquiribles, lo que permitiría reducir los costos de inversión, acelerar el tiempo de comercialización y aumentar la flexibilidad del proceso de producción para adaptarse a cambios. En este sentido, en [62] se destaca la importancia de diseñar layouts de fábricas bajo el enfoque de Industria 4.0, especialmente para la producción a pequeña escala, con el fin de mejorar la competitividad y la flexibilidad en los procesos de producción.

2.4.2. Diseño de interacciones con realidad virtual

La realidad virtual y el metaverso ofrecen la posibilidad de crear entornos virtuales altamente interactivos y personalizados, lo cual puede ser útil en una variedad de contextos, incluyendo la fabricación inteligente. En la *Smart Factory*, el diseño modular puede resultar un enfoque útil para la creación de interacciones en realidad virtual o metaverso. Esto se debe a que el diseño modular permite crear elementos de interacción que se pueden combinar y ensamblar de manera flexible para crear diferentes experiencias virtuales. Por ejemplo, se podrían crear módulos de interacción que representen diferentes máquinas o procesos de fabricación, y luego combinarlos para crear una simulación completa de una fábrica inteligente.

El diseño modular también puede ser útil para hacer que la interacción en realidad virtual o metaverso sea más intuitiva y fácil de usar para los usuarios. Por ejemplo, se podrían crear controles simples y genéricos que se puedan reutilizar en diferentes módulos de interacción, lo que hace que sea más fácil para los usuarios aprender a interactuar con el entorno virtual.

En [63] destaca la relevancia de las experiencias que las personas tienen al interactuar con la tecnología al afirmar que “la forma en que nuestras herramientas están diseñadas influye tanto en la vida de las personas como las decisiones de los estadistas y los movimientos políticos”. En otras palabras, lo que somos y lo que llegaremos a ser como seres humanos está condicionado por la tecnología que utilizamos y cómo la utilizamos. Esto, aplicado al campo del trabajo y el aprendizaje colaborativo con ayuda de ordenadores, sugiere inferencias sobre el impacto del diseño de las experiencias en el compromiso y la motivación.

2.4.3. Diseño de experiencias virtuales con realidad virtual

El diseño de experiencias virtuales con realidad virtual y diseño modular implica la creación de entornos virtuales altamente personalizados y fáciles de usar para los usuarios a través del uso de técnicas de diseño modular.

Según [64] para diseñar una experiencia virtual con realidad virtual y diseño modular, es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

- *Definir el objetivo de la experiencia virtual:* Es importante tener una idea clara de lo que se quiere lograr con la experiencia virtual y cómo se quiere que los usuarios interactúen con ella. Esto puede ayudar a determinar qué elementos de interacción se deben incluir en el diseño.
- *Crear un prototipo de la experiencia virtual:* Es útil crear un prototipo de la experiencia virtual para poder probar y evaluar cómo funcionan los diferentes elementos de interacción y ajustarlos según sea necesario.
- *Utilizar técnicas de diseño modular:* El diseño modular implica la creación de elementos de interacción que se pueden combinar y ensamblar de manera flexible para crear diferentes experiencias virtuales. Esto puede hacer que sea más fácil para los usuarios interactuar con el entorno virtual y puede hacer que sea más fácil actualizar y modificar la experiencia virtual en el futuro.
- *Evaluar y mejorar la experiencia virtual:* Es importante evaluar cómo funciona la experiencia virtual y hacer ajustes según sea necesario para mejorarla. Esto puede incluir recibir comentarios de los usuarios y hacer cambios en el diseño para hacer que la experiencia sea más intuitiva y fácil de usar.

El diseño de experiencias virtuales con realidad virtual y diseño modular implica la creación de entornos altamente personalizados y fáciles de usar para los usuarios a través de la aplicación de técnicas de diseño modular. Según [60], la realidad virtual es más que una tecnología de visualización, es una tecnología de experiencia. Por lo tanto, es importante tener una idea clara del objetivo de la experiencia virtual que se desea ofrecer. Como señala [65], el diseño de una experiencia virtual debe estar guiado por un conocimiento profundo de las necesidades y deseos del usuario.

Para crear una experiencia virtual de calidad, es fundamental hacer prototipos y evaluar el diseño. Como destaca [66], el prototipo es una herramienta importante para la innovación, que permite a los diseñadores probar, evaluar y refinar nuevas ideas antes de implementarlas. Asimismo, es necesario hacer ajustes según sea necesario para mejorar la experiencia. [67], la calidad de la experiencia del usuario no es algo que se pueda diseñar completamente en un solo paso, sino que se desarrolla a través de la iteración y la mejora continua.

2.5. Monitorización en Smart Factory basado en realidad virtual

La monitorización es una herramienta que relaciona aplicaciones, procesos, métodos y funciones que agrupa, administra y evalúa información a gran escala [16]. Todo esto visualizado dentro de gráficos, diagramas y otras representaciones gráficas que ofrecen una manera fácil de presentar y resumir información con el fin de poder comprender lo que está sucediendo [68]. El despliegue realizado por diversos sectores ha hecho que la monitorización se realice de manera inteligente, integrándose entre otros con los sistemas de manufactura de la industria 4.0 [69].

En el paradigma de la Industria 4.0, el acceso fácil a una gran cantidad de máquinas interconectadas y, por lo tanto, a la información relacionada con su comportamiento, resalta la importancia de la monitorización en tiempo real. Esto permite mostrar variables relevantes, como el estado de las máquinas, anomalías de funcionamiento, parámetros de rendimiento, entre otros, de forma ágil, rápida y fácil de comprender [70].

Por otra parte, la monitorización en una *Smart Factory* basada en realidad virtual puede incluir la recopilación de datos, el análisis de la producción y el rendimiento de equipos, así como la detección de posibles problemas o fallos [53]. Esto se puede hacer a través de sensores y dispositivos de monitoreo conectados a un sistema de información centralizado.

La realidad virtual puede utilizarse para visualizar y analizar estos datos de manera más intuitiva y fácil de comprender. Por ejemplo, en [54] mencionan que se puede utilizar para crear una representación virtual de la fábrica y sus procesos, lo que permite a los operadores y a los encargados de la producción ver y analizar los datos en tiempo real de manera más efectiva. También en [12] estudian la monitorización con realidad virtual para entrenar a los empleados en el uso de equipos y en los procesos de producción, lo que puede mejorar la eficiencia y reducir los tiempos de inactividad, aunque de una forma aún muy preliminar.

Además de la monitorización y el análisis de datos, la realidad virtual también puede utilizarse para mejorar la planificación y la toma de decisiones en la *Smart Factory*. Por ejemplo, se puede utilizar para evaluar y optimizar el flujo de trabajo y los procesos de producción, y para simular y evaluar diferentes escenarios de producción y su impacto en el rendimiento y la eficiencia.

2.5.1. Monitorización en Smart Factory

En [53] exponen algunos tipos de monitorización que pueden ser utilizados en sistemas de producción en la industria:

- *Monitorización de equipos*: Se pueden utilizar sensores y dispositivos de monitorización para recopilar datos en tiempo real sobre el rendimiento y el estado de los equipos y maquinaria utilizados en el proceso de producción.

- *Monitorización de procesos*: También se pueden utilizar sensores y dispositivos de monitorización para recopilar datos sobre los procesos de producción en sí mismos, como el tiempo de ciclo, la calidad de los productos, etc.
- *Monitorización de la calidad*: Los sistemas de monitorización de la calidad pueden utilizar sensores y dispositivos de medición para evaluar la calidad de los productos en tiempo real y detectar problemas o deficiencias.
- *Monitorización de la utilización de recursos*: Los sistemas de monitorización de la utilización de recursos pueden utilizar sensores y dispositivos de monitorización para recopilar datos sobre el uso de energía, agua, materiales, etc.

2.5.2. **Analítica de datos con realidad virtual, su uso, desarrollo y aplicación en una Smart Factory**

La analítica de datos se refiere al proceso de recopilación, transformación, análisis y visualización de grandes volúmenes de datos con el objetivo de obtener conocimientos significativos, patrones y tendencias que puedan ser utilizados para tomar decisiones informadas y estratégicas. Es una disciplina que combina diversas técnicas y herramientas, como estadísticas, minería de datos, aprendizaje automático y visualización de datos, para extraer información valiosa y relevante de conjuntos de datos complejos [71].

La analítica de datos con realidad virtual puede ser utilizada en una *Smart Factory* para mejorar la toma de decisiones y la eficiencia del proceso de producción. Al proporcionar una visualización en 3D de los datos de la fábrica, los usuarios pueden interactuar con ellos de manera más intuitiva y comprender mejor cómo funciona el sistema.

Por ejemplo, en [72] se utiliza la realidad virtual para mostrar la ubicación y el estado de los equipos en tiempo real, así como para simular escenarios de producción y evaluar su impacto en la eficiencia y la calidad del producto final. También puede ser utilizada para entrenar a los trabajadores de la fábrica en el uso de nuevas máquinas y equipos de manera segura y eficiente.

El desarrollo de una solución de analítica de datos con realidad virtual para una *Smart Factory* puede involucrar la integración de diversas fuentes de datos, como sensores de la fábrica, sistemas de gestión de producción y bases de datos de inventario, para proporcionar una visión completa y en tiempo real del funcionamiento de la fábrica [73]. También puede ser necesario desarrollar interfaz de usuario y herramientas de visualización de datos personalizadas para facilitar la interacción con la solución de realidad virtual.

En términos de aplicación, la analítica de datos con realidad virtual puede ser utilizada por los gerentes de la fábrica para tomar decisiones informadas sobre la planificación de la producción, la asignación de recursos y el mantenimiento preventivo de equipos. También puede ser utilizada por los trabajadores de la fábrica para mejorar la eficiencia en su trabajo y reducir los tiempos de inactividad. Además, puede ser

utilizada para demostrar el rendimiento y la eficiencia de la fábrica a los clientes y socios comerciales [55].

2.6. Síntesis

Los antecedentes previos indican que el metaverso está evolucionando como un espacio de trabajo industrial a gran escala. Una ventaja atractiva y anticipada es la capacidad de las empresas para crear copias digitales de todos sus procesos, generando así un “gemelo digital” que puede ser probado en el metaverso antes de ser implementado físicamente. De esta manera, se pueden corregir y mejorar los diseños antes de iniciar la construcción, lo que podría reducir considerablemente el tiempo y los recursos necesarios.

La calidad inmersiva de la realidad virtual es un aspecto clave que hace posible el desarrollo del metaverso, ya que permite a los usuarios interactuar con objetos y escenarios de manera precisa y realista. En consecuencia, la integración del metaverso en actividades cotidianas estará estrechamente vinculada al progreso y refinamiento de los dispositivos de realidad virtual.

Tras revisar la literatura científica y técnica, se ha encontrado una amplia variedad de enfoques sobre los metaversos impulsados por la realidad virtual en diferentes sectores. Se prevé que en los próximos años esta tecnología se expanda gradualmente a todos los sectores y tenga una gran aceptación.

Diseño 3D de entornos virtuales: Una primera aproximación al desarrollo de un Framework de realidad virtual

Este capítulo es objeto de la siguiente publicación:

L. O. Alpala et al. *Methodology for the design and simulation of industrial facilities and production systems based on a modular approach in an industry 4.0 context*. Dyna, 2018, vol. 85, no 207, p. 243-252.

<https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.68545>

3.1. Motivación

En este capítulo, se presenta la primera aproximación al desarrollo de un *framework* de realidad virtual basado en el diseño 3D de entornos virtuales colaborativos, en el contexto de la creación de una *Smart Factory*. El objetivo general de este proyecto es proponer una estrategia iterativa para el desarrollo de un sistema de realidad virtual que permita incorporar funciones de diseño modular y monitorización de procesos en una *Smart Factory*, a través de la experimentación colaborativa en un entorno de metaverso.

Para alcanzar este objetivo, se ha diseñado un entorno 3D inmersivo y realista utilizando los principios de realidad virtual y metaverso. El enfoque se centra en representar de manera visual una planta troncal de la *Smart Factory*. Este enfoque de diseño en 3D proporciona ventajas clave, ya que permite una mejor visualización de la planta final y facilita la detección de posibles problemas de diseño. Además, brinda la posibilidad de experimentar con diferentes opciones de diseño de manera ágil y sencilla.

De esta manera, en este capítulo presenta la primera etapa del proyecto *Digital*

Factory Metaverse, un entorno virtual 3D diseñado para realidad virtual y metaverso. Se ha adoptado una metodología centrada en el diseño modular y en las características específicas de una *Smart Factory*. Se utilizaron herramientas especializadas de diseño 3D para incorporar los elementos personalizados de la planta de producción. El proyecto se completó utilizando el software Unreal Engine, ajustando detalles como la iluminación, los materiales, las texturas, los sonidos y la construcción general de las escenas. Estas escenas están listas para ser integradas en un *framework* de realidad virtual más avanzado, que permitirá la experimentación y monitorización colaborativa en un entorno de metaverso.

3.2. Primera aproximación al desarrollo de un framework de realidad virtual basado el diseño de entornos virtuales 3D

En esta sección, se presenta la descripción de la primera versión de desarrollo de un *framework* de realidad virtual basado en entornos virtuales 3D. Para esta primera aproximación del *framework* se ha tenido en cuenta el diseño 3D como eje central para la representación de entornos virtuales acorde a la realidad.

La Figura 3.1 muestra la representación visual del *framework* en su primera versión, donde se incluye el diseño de objetos tridimensionales y una primera realización a través del software Unreal Engine. En esta primera versión, el enfoque se centra principalmente en la creación de un entorno 3D de alta calidad y realismo, así como en la posibilidad de realizar recorridos virtuales dentro de dicho entorno.

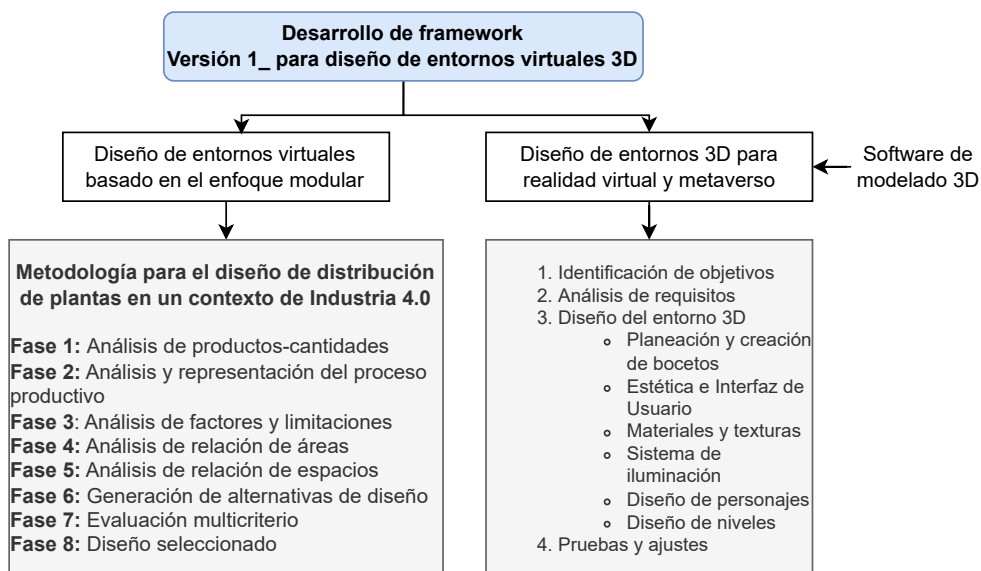


FIGURA 3.1: Primera aproximación a desarrollo de framework para diseño 3D de entornos virtuales.

Sin embargo, es importante destacar que esta versión inicial del *framework* tiene ciertas limitaciones en cuanto a su capacidad. Su enfoque principal se centra en la visualización y el diseño realista del entorno 3D para la plataforma WIN 64, dejando aspectos más avanzados, como la interacción y la colaboración en tiempo real, para futuras versiones del *framework*. En versiones posteriores, se irán integrando nuevas funcionalidades que permitirán una experiencia más inmersiva y completa en entornos virtuales colaborativos utilizando realidad virtual y metaverso.

A continuación se describen los aspectos más importantes de la primera versión del *framework*.

3.2.1. Diseño de entornos virtuales basado en el enfoque modular

El enfoque modular en el diseño de entornos virtuales se basa en la idea de dividir el entorno virtual en distintas partes o módulos que pueden ser diseñados y desarrollados de manera independiente y luego combinados para crear el entorno completo. Cada módulo se centra en una función específica y se puede utilizar de manera reutilizable en diferentes entornos virtuales.

Esto permite una mayor flexibilidad y eficiencia en el diseño y desarrollo del entorno virtual, ya que cada módulo se puede ajustar y actualizar de manera individual sin tener que realizar cambios en el resto del entorno. Además, el enfoque modular también permite una mayor colaboración y participación de diferentes equipos o individuos en el proceso de diseño y desarrollo.

Para esta investigación se propone una primera aproximación de diseñar un entorno 3D, siguiendo los principios de realidad virtual y metaverso, con el fin de representar de manera inmersiva y realista una planta troncal de *Smart Factory*. Esta investigación busca adentrarse en el potencial de estas tecnologías emergentes y su aplicación en el ámbito de la fabricación inteligente. Para ello, se explora las diferentes técnicas de diseño y modelado 3D utilizadas en la creación de entornos virtuales realistas mediante el uso de metodologías, centrándose en la representación precisa de los productos, máquinas, instalaciones, procesos y flujos de producción característicos de una planta en *Smart Factory*.

Con el fin de abordar el diseño y la distribución de instalaciones industriales desde una perspectiva de diseño modular en *Smart Factory*, se ha propuesto trabajar con una metodología adaptada para ajustarse a los principios específicos de este entorno. La metodología presentada como adaptación [74], SLP Modularity 4.0, se basa en una visión modular y se enmarca en el contexto de la Industria 4.0. Esta metodología es una adaptación de la Metodología SLP (Systematic Layout Planning) [75], que se centra en el diseño tradicional de instalaciones industriales.

A partir de la metodología propuesta para el diseño y distribución de plantas en un contexto de Industria 4.0, es posible preparar proyectos bajo una distribución personalizada adaptada a factores de las tecnologías disruptivas de la industria 4.0. Esto permite una mayor flexibilidad y eficiencia en la distribución de las instalaciones,

teniendo en cuenta aspectos clave como la integración de sistemas ciberfísicos, el uso de Internet de las cosas, la inteligencia artificial y la automatización avanzada. Así, se logra optimizar el rendimiento y la adaptabilidad de las plantas industriales a las demandas cambiantes del mercado y las tecnologías emergentes.

En la Figura 3.2 se muestra el esquema de la metodología propuesta. Esta metodología consta de 8 fases para guiar al diseñador a tomar las decisiones más acertadas al momento de enfrentar el problema de distribución en planta, las fases señaladas en el recuadro rojo muestran el enfoque de La Industria 4.0 la cual se ha propuesto en esta investigación en complemento a la metodología SLP.

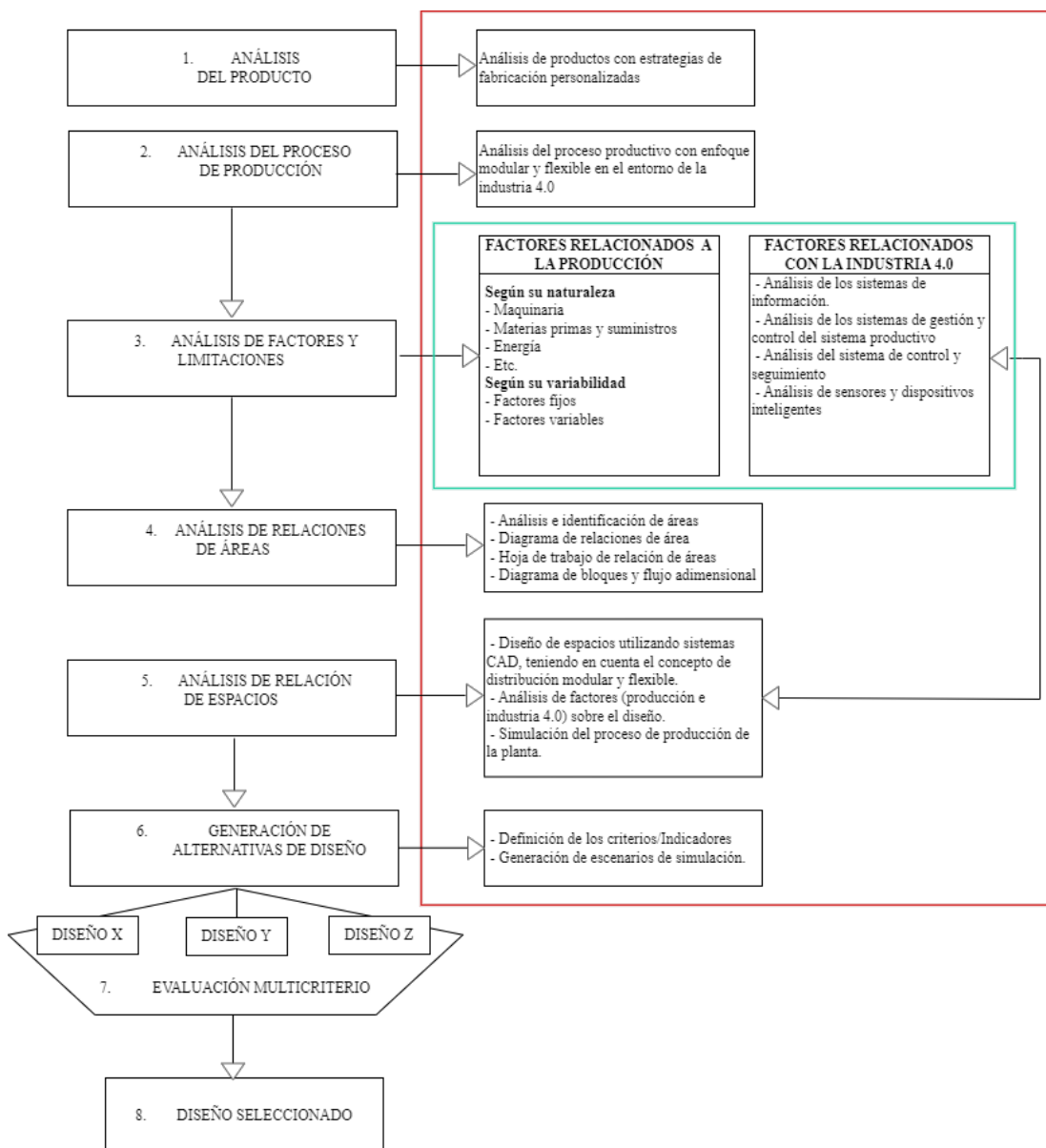


FIGURA 3.2: Metodología para el diseño de distribución de plantas en un contexto de Industria 4.0.

Las fases de la metodología se describen a continuación:

- *Fase 1: Análisis de productos-cantidades:* Esta fase es el punto de partida de la metodología y se refiere al estudio y análisis de los productos y cantidades que se fabricarán en la planta, es por ello que se deben analizar al menos los siguientes ítems para ser tomados en cuenta en el diseño de la instalación industrial: Estudio de mercado y previsión de la demanda, estrategia de fabricación según el grado de personalización del producto, tipo de distribución en planta, análisis de capacidad del producto.
- *Fase 2: Análisis y representación del proceso productivo:* En el análisis y representación del proceso productivo, se identifican una serie de elementos que son fundamentales para comprender su funcionamiento. Entre estos elementos se incluyen los flujos de materiales e información, las distancias recorridas, los tiempos de ciclo, las estaciones de trabajo y los niveles de inventario, entre otros aspectos relevantes. Se pueden utilizar diferentes tipos de representación del proceso productivo como el analítico, sinóptico, flujo de proceso, diagrama de bloques, etc. Es necesario no solo representar el diagrama, sino también identificar el tipo de tecnología que se empleará en el proceso.
- *Fase 3: Análisis de factores y limitaciones:* Los factores en una planta de producción son aquellos que intervienen en el proceso productivo de forma variable o susceptible de variación y cuya alteración provoca modificaciones en el resultado del proceso productivo.
- *Fase 4: Análisis de relación de áreas:* En esta etapa se realiza un análisis de todas las áreas que formarán parte de la instalación industrial, incluyendo el área administrativa, área de servicios, patios de maniobras y áreas verdes. Las técnicas analizadas en este apartado son el diagrama de relación de áreas, hoja de cálculo, diagrama adimensional de bloques y flujos.
- *Fase 5: Análisis de relación de espacios:* Esta etapa debe ser trabajada a profundidad teniendo en cuenta conceptos de arquitectura e Ingeniería Industrial, de esta forma permite lograr un layout acorde a las necesidades del sistema productivo y de la Industria 4.0.
- *Fase 6: Generación de alternativas de diseño:* Definición de criterios/indicadores: Dependiendo de la actividad del proyecto de diseño de trazado que se esté realizando, los criterios pueden cambiar, para el caso de estudio se han definido algunos criterios a considerar para la evaluación del trazado, tales como: Mano de obra, Capacidad productiva, Flujo de material, Tiempo de ciclo, Costos relacionados con el manejo de materiales dentro de la planta.
- *Fase 7: Evaluación multicriterio:* Se lleva a cabo una evaluación multicriterio con el fin de determinar cuál es el layout más apropiado para el diseño definitivo de la planta. Para ello, en primer lugar, se valoran las diferentes alternativas en función de unos criterios previamente establecidos junto con sus correspondientes escalas de ponderación.
- *Fase 8: Diseño seleccionado:* Por último, según las decisiones del diseñador basadas

en el tipo de evaluación realizada para determinar el mejor trazado, se obtendrá un diseño final para su implementación. Este diseño deberá incluir información detallada sobre todo el sistema productivo, cumpliendo con la normativa actual y teniendo en cuenta la necesidad de ser adaptable en el contexto de la Industria 4.0.

3.2.2. Diseño de entornos 3D para realidad virtual y metaverso

En esta sección, se describe el proceso de diseño de entornos virtuales 3D para realidad virtual y metaverso, dentro de la estructura del *framework* en desarrollo. Se ha adaptado el proceso de diseño tradicional de entornos virtuales [76] para ajustarlo a entornos basados en realidad virtual con sistemas colaborativos en la industria 4.0.

La metodología propuesta (ver Figura 3.3), aprovecha las oportunidades de la realidad virtual y el metaverso en la industria 4.0, permitiendo una mayor interacción, colaboración y exploración de los entornos virtuales. Se ha incorporado elementos clave de la realidad virtual y el metaverso al proceso de diseño tradicional, proporcionando una guía estructurada para el diseño de entornos virtuales 3D en proyectos industriales.

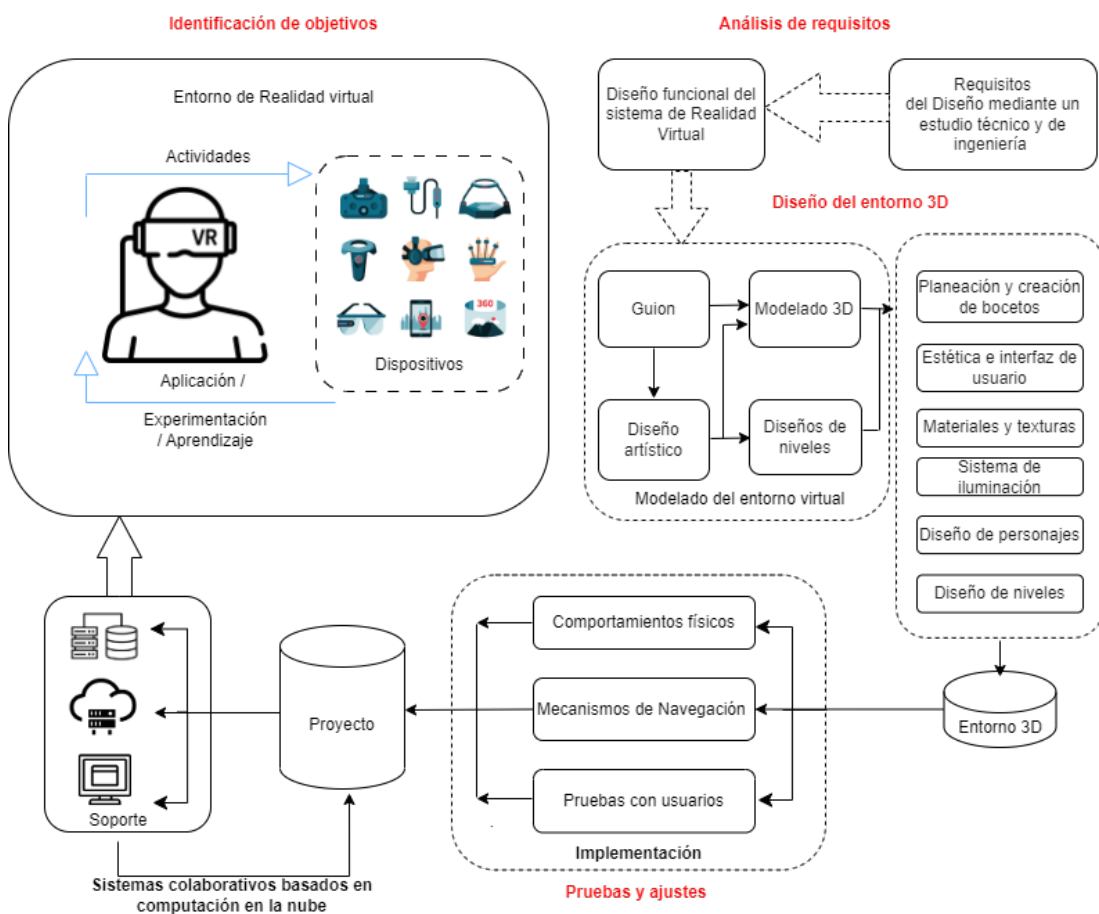


FIGURA 3.3: Metodología de trabajo con entornos 3D en realidad virtual y metaverso.

A continuación se describe las fases de la metodología:

Fase 1. Identificación de objetivos

Es importante establecer los objetivos del proyecto y cómo se utilizará la realidad virtual y los dispositivos en el proceso. Esto puede incluir la formación del personal, cronograma y presupuesto.

Fase 2. Análisis de requisitos

Una vez establecidos los objetivos, se debe realizar un análisis de los requisitos para el diseño, para ello se recomienda realizar un estudio técnico y de ingeniería que permita recolectar toda la información necesaria de los requisitos y restricciones que se tiene para la realización del proyecto.

Fase 3. Diseño del entorno 3D

Con los requisitos identificados, se puede comenzar a diseñar el entorno 3D utilizando herramientas de modelado 3D. Para esta fase se talla los principales aspectos a tener en cuenta en el diseño:

- *Planeación y creación de bocetos:* Antes de planificar un proyecto de realidad virtual, es necesario tener claro el objetivo y conocer al público objetivo. Luego se crea un concepto y un storyboard que incluye la definición del mundo virtual, personajes, trama y estructura general de la experiencia. A partir del storyboard, se pueden crear bocetos y modelos 3D de los elementos y entornos.
- *Estética e Interfaz de Usuario:* La estética y la interfaz de usuario son dos aspectos cruciales en un proyecto de realidad virtual. Al diseñar la estética y la UI de un proyecto de realidad virtual, es importante tener en cuenta tanto la funcionalidad como la estética, con el objetivo de crear una experiencia equilibrada y coherente para el usuario.
- *Materiales y texturas:* En un proyecto de realidad virtual, es fundamental seleccionar materiales y texturas coherentes y realistas con el mundo virtual para crear un ambiente inmersivo. La iluminación, reflexión, refracción y la interacción con otros objetos son consideraciones importantes. Las texturas y detalles pueden mejorar la sensación de realismo, pero es necesario tener en cuenta la resolución y calidad para evitar distorsiones en la experiencia del usuario.
- *Sistema de iluminación:* El sistema de iluminación en un proyecto de realidad virtual es de gran importancia, ya que afecta la sensación de realismo e inmersión del usuario. Es importante que la iluminación sea coherente y realista con el mundo virtual, considerando la fuente, dirección, intensidad, sombras y las interacciones con otros objetos. También se deben tener en cuenta las diferentes condiciones de iluminación. Es posible que los usuarios interactúen con la iluminación, y se debe asegurar la coherencia y realismo en el sistema de iluminación.

- *Diseño de personajes*: El diseño de personajes es importante en un proyecto de realidad virtual para la inmersión y experiencia del usuario. La apariencia de los personajes debe ser coherente con el mundo y la historia del proyecto. El movimiento y animación de los personajes deben ser naturales y fluidos. En un proyecto de realidad virtual, los personajes pueden ser interactivos, por lo que es importante tener en cuenta la interacción en el diseño de personajes.
- *Diseño de niveles*: El diseño de niveles es importante en un proyecto de realidad virtual. Debe haber una lógica clara en la navegación y una estructura fácil de seguir para el mapa. La estética debe ser coherente con el mundo y la historia. Los niveles deben ser desafiantes y divertidos e incluir personajes y eventos que se integren en la historia. También es importante optimizar el diseño de niveles para una experiencia fluida y sin interrupciones.

Fase 4. Pruebas y ajustes

Antes de poner en marcha el proyecto con realidad virtual, se deben realizar pruebas para asegurar que todo funciona correctamente y hacer los ajustes necesarios mediante simulación por computadora que genera los software de diseño. Los ajustes que se realicen pueden realizarse mediante escenarios creados para comparación.

Finalmente, el proyecto se implementa utilizando un sistema colaborativo que permite su funcionamiento en tiempo real y la conexión a través de Internet desde cualquier parte del mundo. Esta funcionalidad brinda la posibilidad de colaborar y compartir información con equipos distribuidos geográficamente, fomentando la colaboración global y la participación de expertos y profesionales de diferentes ubicaciones.

3.3. Estudio de caso

3.3.1. Proyecto-Digital Factory Metaverse

En esta investigación, se presenta un caso de estudio denominado *Digital Factory Metaverse* (ver Figura 3.4), un proyecto que tiene como objetivo representar una *Smart Factory*. Para ello, se ha enfocado en el sector más desarrollado en este contexto: la industria automotriz. Este sector permite visualizar y aplicar diversas tecnologías disruptivas de la industria 4.0, lo que facilita su representación y estudio a través del desarrollo del *framework* de realidad virtual.

El proyecto presentado se caracteriza por su diseño basado en el hiperrealismo para realidad virtual, con el propósito de brindar a los usuarios una experiencia inmersiva que se asemeje lo más posible a la realidad. Se busca crear un entorno virtual que refleje con precisión el funcionamiento de una *Smart Factory* en el sector automotriz, permitiendo a los usuarios explorar y estudiar las distintas tecnologías en acción.



FIGURA 3.4: Pantalla de inicio de la aplicación *Digital Factory Metaverse*.

El enfoque que se ha seguido en esta investigación es completamente nuevo para la planificación y el diseño de plantas industriales, ya que se utiliza la realidad virtual como tecnología disruptiva para explorar un entorno virtual de una planta industrial acorde a la realidad bajo un enfoque de *Smart Factory*.

El proyecto es una primera aproximación de un caso de estudio aplicando en el sector automóvil, por lo que toda la representación 3D del mundo virtual está basado en un gemelo digital cuyo aspecto y funcionalidad tiene que ver mucho con la realidad, esto a su vez permite que se pueda simular mediante diseños 3D el comportamiento de todo el sistema que compone una planta de producción.

En las siguientes secciones se muestra a detalle el proceso de diseño del entorno virtual 3D de la fábrica acorde a las metodologías de diseño.

3.3.1.1. Historia y guionización del proyecto

Digital Factory Metaverse es un aplicativo de realidad virtual que ofrece la posibilidad de hacer un recorrido por una planta industrial con enfoque de *Smart Factory* reconociendo diferentes zonas de logística y producción. En él se puede identificar: maquinaria, herramientas, distribución y la aplicación de tecnologías de la Industria 4.0, además de la metodología *ATO* (*Assemble-to-Order*) (Estrategia de fabricación personalizada para trabajar en *Smart Factory*).

Descripción de la planta de producción

La idea original del proyecto *Digital Factory Metaverse* se da por la aplicación, uso, capacitación y entrenamiento de personal tanto para empresas como educación en entornos de producción en *Smart Factory*. Teniendo en cuenta que acceder a una planta de producción en *Smart Factory* es muy complejo debido a que muchas de las empresas

ni siquiera conocen el término y otras apenas están iniciando en su implementación, debido a esto, se ha tomado como caso de estudio una planta de ensamble de automóviles debido a que este sector es uno de los pioneros en la implementación de tecnologías de la Industria 4.0 y con ello se trata de diseñar, simular y probar con realidad virtual el funcionamiento de la planta de producción acorde a la realidad.

El entorno 3D de la planta de producción servirá de apoyo a las prácticas académicas y profesionales, ya que permite a profesores, estudiantes y trabajadores de la industria experimentar en primera persona todas las acciones y decisiones propias de los procesos logísticos y productivos de una fábrica. Con ello se potencia el conocimiento en la materia y el desarrollo de habilidades y competencias útiles para integrarse al mundo laboral. *Digital Factory Metaverse* es un entorno de aprendizaje con procesos y tecnologías basados en la realidad industrial. Los escenarios están diseñados para reproducir diferentes problemáticas propias de los procesos industriales.

Para el diseño de la planta se ha considerado realizar un diseño completo de las instalaciones tanto internas como externas, con el fin de tener un estudio adecuado de la *Smart Factory* y sus tecnologías.

3.3.1.2. Género

Actualmente, existen varios géneros y subgéneros que subyacen en el desarrollo de aplicativos tipo videojuegos. *Digital Factory Metaverse* es un aplicativo basado en juego de rol (JDR) en el que uno o más jugadores desempeñan un rol o papel en un escenario virtual, en este caso, una *Smart Factory*, donde transcurre una historia y en la cual se completan misiones hasta alcanzar el objetivo final. Cuando un usuario desempeña un rol dentro de la planta, está interpretando el papel de un personaje, que puede ser un visitante de la planta industrial, un operario o administrador.

En la actualidad, este género se entremezcla con otros, como el de aventura, de acción o de estrategia. Uno de los subgéneros del JDR son los JDR tácticos, donde la manera de crecer dentro del videojuego es conseguir objetivos mediante la obtención de experiencia. Así, en función de los objetivos o prácticas, se ganará una serie de puntos de experiencia. Cabe destacar que comparte una gran cantidad de conceptos de los juegos de estrategia.

3.3.1.3. Público objetivo

El proyecto *Digital Factory Metaverse* está diseñado para atender a dos públicos específicos: el sector educativo y el sector productivo. Para el sector educativo, el proyecto actúa como una herramienta de aprendizaje práctico que permite a los estudiantes adquirir habilidades y competencias útiles para integrarse al mundo laboral. Por otro lado, para el sector productivo, el aplicativo representa una herramienta de capacitación que ayuda a los trabajadores a adaptarse a las nuevas tecnologías y a los procesos de la cuarta revolución industrial. En ambos casos, el uso de simuladores

virtuales proporciona una experiencia similar a la de un escenario real, permitiendo a los usuarios adquirir habilidades prácticas de manera efectiva.

En la Figura 3.5 se muestra el público objetivo al que está dirigido el proyecto.

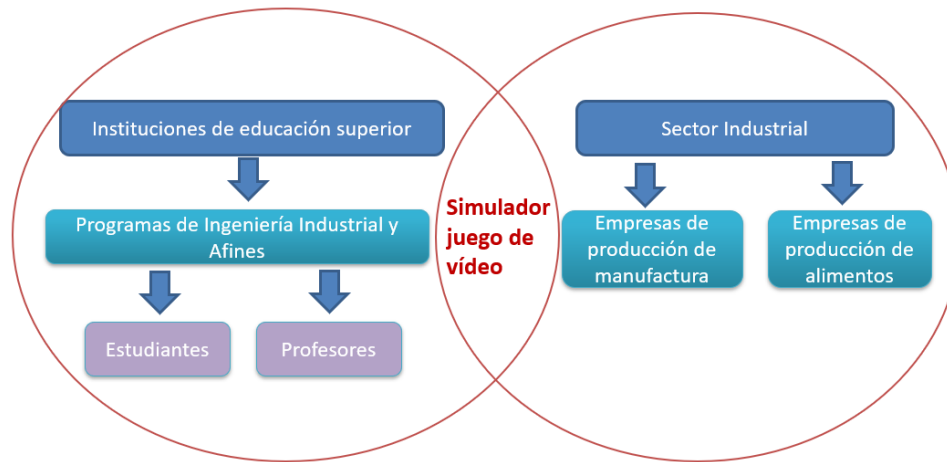


FIGURA 3.5: Público objetivo del proyecto *Digital Factory Metaverse*.

3.3.1.4. Plataformas y Hardware necesario

Se describe a continuación el hardware utilizado para el desarrollo de los modelos 3D y desarrollo de realidad virtual, el cual será utilizado para el desarrollo completo del proyecto.

Hardware necesario

Para el desarrollo y funcionamiento se requiere el uso de hardware adecuado, para la realización de esta investigación se utilizó los siguientes equipos con sus características:

Computador gamer gama media alta

- Procesador y sistemas operativo de 64 bits.
- Sistema Operativo: Windows 11
- Procesador: AMD Ryzen 9 6800H Procesador 3.2 GHz
- Memoria: 32 GB de RAM
- Gráficos: NVIDIA GeForce RTX 3090
- Red: Conexión de banda ancha a Internet
- Almacenamiento: 50 GB de espacio disponible

Visor de realidad virtual Meta Quest 2

- Meta Quest 2 tiene un FOV medio de 90°, y la pantalla que montan es una IPS LCD con una resolución de 1832×1929 píxeles por ojo y un refresco de pantalla máximo de 90 Hz. También cuentan con dos controladores táctiles con 6 grados de libertad de movimiento, gracias a los cuales pueden ser rastreados por las cámaras frontales que incorporan el visor.

3.3.1.5. Software utilizados para el diseño y desarrollo del proyecto

Software de diseño 3D

Sketch Up y Blender son dos programas de modelado 3D muy populares que se pueden utilizar para proyectos de realidad virtual y metaverso. Sketch Up es un software de modelado 3D fácil de usar y accesible, que se especializa en la creación de modelos simples y rápidos. Es una excelente opción para proyectos de entornos virtuales 3D que requieren la creación rápida de espacios y objetos 3D. Sketch Up también ofrece una amplia variedad de herramientas y recursos para la personalización de los modelos, lo que lo hace ideal para la creación de proyectos de realidad virtual más elaborados.

Blender, por otro lado, es un software de modelado 3D más avanzado y versátil, que se especializa en la creación de modelos complejos y detallados. Blender es una excelente opción para proyectos de metaverso y realidad virtual que requieren una mayor calidad visual y una gran cantidad de detalles en los modelos. Además, Blender cuenta con una amplia gama de herramientas para la animación, iluminación y efectos especiales, lo que lo hace ideal para proyectos de realidad virtual y metaverso más sofisticados.

Software para desarrollo de realidad virtual y metaverso

Se utilizó **Unreal Engine** versión 5.0, es un motor de juegos y desarrollo de experiencias en tiempo real que ha ganado popularidad en la industria de la realidad virtual y el metaverso debido a sus poderosas herramientas y recursos para la creación de experiencias en tiempo real.

El uso de Unreal Engine para la realidad virtual y el metaverso es importante porque permite a los desarrolladores crear experiencias de alta calidad con una amplia gama de herramientas de modelado, 3D, animación, texturizado, efectos especiales y programación. Además, Unreal Engine permite a los desarrolladores crear experiencias interactivas en tiempo real, lo que las hace ideales para la realidad virtual y el metaverso.

3.3.2. Diseño y montaje del proyecto Digital Factory Metaverse

En esta sección se presenta el diseño y montaje del proyecto *Digital Factory Metaverse* que consiste en la creación de un entorno virtual 3D que simula una fábrica automatizada de automóviles. El diseño y montaje del proyecto se ha llevado a cabo mediante el uso de las metodologías de diseño propuestas.

Para lograrlo, se ha llevado a cabo un modelado exhaustivo de la fábrica, incluyendo tanto la maquinaria como el entorno físico, lo que ha permitido crear una representación virtual muy detallada. Para el desarrollo del proyecto se aplicó las 8 fases de la metodología SLP Modularity 4.0, con ello se realizó una planeación adecuada respecto a los productos, instalaciones y la distribución de planta para todas las áreas. Para más detalle ver el Apéndice C.

A continuación, se muestra la fase 3 de la metodología que se ha sido descrito detalladamente en la Sección 3.2.2, la cual se enfoca en el diseño del entorno 3D. Se han seguido una serie de pasos clave que han guiado el diseño y desarrollo del proyecto. Estos pasos se han aplicado con el objetivo de lograr una representación virtual precisa y de alta calidad del entorno de la fábrica. A continuación, se presentan los principales pasos que se han seguido:

1. Planeación y creación de bocetos

Para la creación de los bocetos se realizó un estudio técnico de ingeniería de los procesos, generales e independientes, a tener en cuenta en el diseño de la fábrica, para ello se diseñaron diferentes bocetos a mano y mediante herramientas de diseño gráfico como app.diagrams.net. En la Figura 3.6 se muestra un ejemplo de la representación gráfica de los bocetos utilizando el software *draw.io* para su diseño, ver los bocetos completos en el repositorio del proyecto <https://github.com/mickluis/framework-vr-metaverse>.

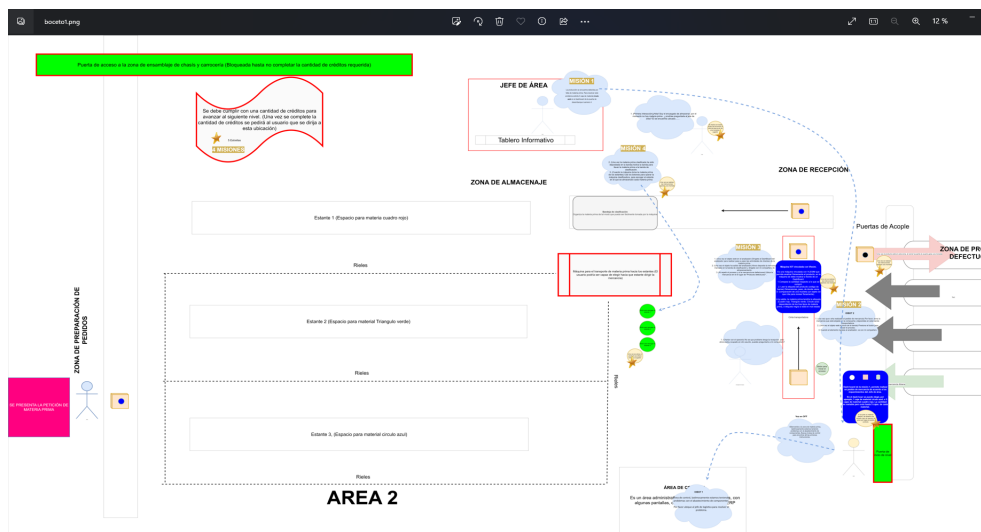


FIGURA 3.6: Ejemplo de boceto utilizando para el diseño del proyecto.

2. Estética e Interfaz de Usuario

La estética y la interfaz de usuario (UI) son dos aspectos importantes para el proyecto. La estética le da la apariencia visual al aplicativo, mientras que la interfaz el cómo los usuarios interactúan en la aplicación. En el contexto del proyecto *Digital Factory Metaverse*, ambos aspectos son cruciales para crear una experiencia de usuario atractiva y fácil de usar.

Para crear una estética atractiva, se ha tomado como referencia modelos reales de la planta de producción, con el software Unreal Engine se generó escenarios hiperrealistas que hacen del aplicativo un escenario muy parecido a la realidad, toda la estética e interfaz se consiguió gracias a los plugins y gráficos del software. En la Figura 3.7 se muestra un ejemplo de la representación estética e interfaz de usuarios lograda con el software Unreal Engine dentro del proceso de diseño.



FIGURA 3.7: Estética y UI para el proyecto.

3. Materiales y texturas

Los materiales y texturas utilizados dentro del aplicativo son creados a partir de imágenes, para las texturas se utilizan los siguientes formatos JPG, PNG o TGA que son compatibles con Unreal Engine, a partir de ello se creó la textura y se dio paso a la creación de los materiales. En la Figura 3.8 se muestra algunos de los materiales y texturas creados para el proyecto dentro de Unreal Engine.



FIGURA 3.8: Materiales y texturas para el proyecto.

Para la creación del material fue necesario que se tengan añadidas todas las texturas que hacen parte del material, como por ejemplo textura de rugosidad, textura de metalizado, textura de sombras, etc. que son necesarios para tener un mejor acabado, pero si el material es algo más simple solo basta con colocar algunas constantes en lugar de imágenes, aunque lo recomendado es hacer uso de ambas de constantes y las texturas para tener un material de más calidad y se vea más real dentro del aplicativo, luego de esto solo es cuestión de enlazar las diferentes texturas al material para poder aplicarlo al escenario u objetos que necesiten de esta creación.

4. Sistema de iluminación

Para mantener una calidad realista del proyecto, mediante las opciones de iluminación de Unreal Engine se utilizaron diferentes tipos de luz para ayudar a crear un entorno virtual con una sensación y apariencia más realistas y aumentar la inmersión del usuario.

Los tipos de luces utilizados en el proyecto son la iluminación global, que incluye luz ambiental y luz de sol, la luz puntual, que es una fuente de luz con un radio de acción limitado que puede ser colocada en diferentes puntos del entorno. También se utilizó luces direccionales, que simulan la luz del sol y pueden ser utilizadas para crear sombras y efectos de luz y sombra en el entorno.

Con base en esto se han distribuido dentro del aplicativo varias luces, con el fin de minimizar las partes más oscuras, dando una mejor experiencia dentro de las zonas que se encuentran en el complejo industrial. En la siguiente Figura 3.9 se muestra el estilo de iluminación para el proyecto de algunas escenas del aplicativo.

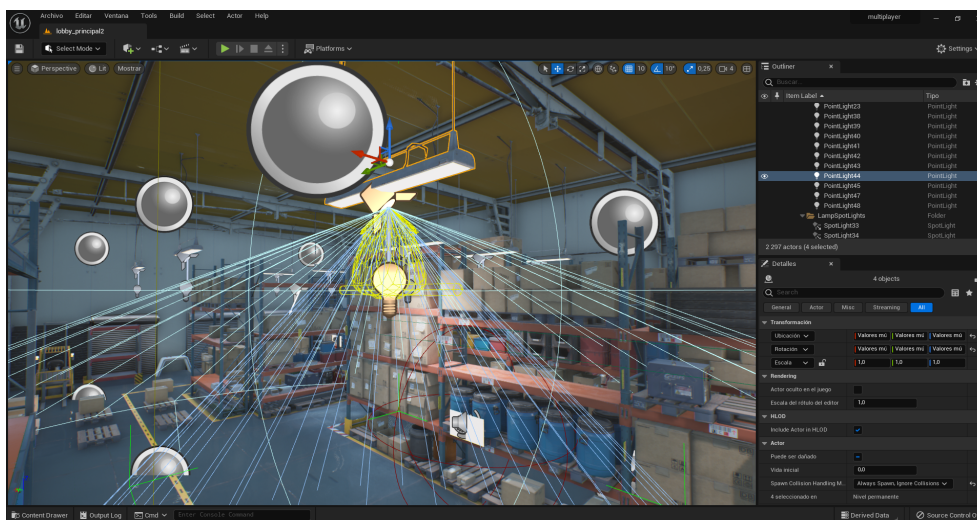



FIGURA 3.9: Diseño de sistema de iluminación para proyecto.

5. Diseño de personajes

El diseño de personajes es una parte importante dentro del proyecto de realidad virtual, ya que los personajes son una parte fundamental de la experiencia de usuario. Al diseñar los personajes para este entorno virtual, para el aplicativo se ha tenido en cuenta el diseño de diferentes personajes entre los que se tiene el Peón: que representa al avatar del usuario cuando se realiza sesiones multijugador, también se tiene personajes secundarios NPC que son utilizados para representar al personal de la planta como operarios, administrativos, etc. Y un personaje especial que se ha diseñado es un robot para guiar y mantener informado a los usuarios que ingresan.

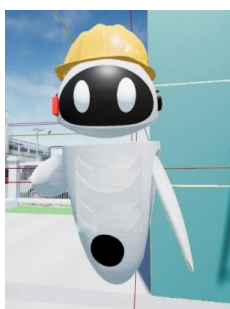
A continuación se muestran en la Tabla 3.1 tipos de personajes diseñados para soportar la interacción en el aplicativo durante su recorrido virtual.

Personajes	Descripción	Características
	<p>Peón: es el personaje principal, tiene la capacidad de moverse hacia todos los lados sin restricción alguna, para una mejor experiencia dentro del aplicativo, lo que le permitirá desplazarse de manera uniforme, este personaje funciona como un Avatar que representa al usuario en el entorno virtual.</p>	<p>Este es un personaje simple, donde no se muestra todo el cuerpo completo. Solo se muestra el torso y la cabeza, este no tiene ninguna habilidad especial dentro del aplicativo.</p>



Personal: NPC (Non-Player Character) son personajes secundarios, que se encuentran por fuera y por dentro de la *Smart Factory* y con los cuales el jugador puede realizar una interacción.

Dicho personaje se localiza por el complejo industrial de manera arbitraria y libre.



Robot: es un personaje secundario, cumple la función de dar la bienvenida y de guiar al jugador para que pase por las distintas áreas del complejo industrial.

Personaje encargado de dar la bienvenida. Este comunicará y guiará al jugador para que se desplace al siguiente punto, donde encontrará más información al respecto sobre lo que debe realizar dentro del aplicativo.

TABLA 3.1: Personajes dentro del aplicativo.

6. Diseño de niveles

Para el proyecto se siguió la creación de diferentes niveles enfocados en las zonas del complejo industrial de la *Smart Factory* en la que se basa el proyecto. Para una mejor optimización de recursos computacionales se dividieron los niveles de forma individual para posteriormente unirlos como un todo.

Se diseñó mediante software CAD 3D diferentes assets 3D propios de la *Smart Factory* para integrarlos en el software Unreal Engine. En la Tabla 3.2 se muestra los diferentes niveles creados que hacen referencia al entorno 3D de la planta industrial y sus zonas correspondientes.

Niveles del Proyecto



- Nivel 1: Lobby
- Nivel 2: Zona externa
- Nivel 3: Zona administrativa
- Nivel 4: Zona materia prima
- Nivel 5: Zona producción
- Nivel 6: Zona producto terminado

TABLA 3.2: Niveles del proyecto Digital Factory Metaverse.

A continuación se presenta las principales características de los niveles.

Nivel 1: Lobby

Este nivel incluye las siguientes representaciones 3D:

1. Un ambiente visualmente atractivo y diseñado para que los usuarios se sientan inmersos en la experiencia de realidad virtual.
 2. Elementos interactivos, para que los usuarios puedan acceder a diferentes secciones del aplicativo y personalizar su experiencia.
 3. Información sobre el aplicativo, como descripciones de los modos de juego, tutoriales y guías de usuario.
 4. Áreas de socialización donde los usuarios puedan interactuar con otros usuarios.
- En la Figura 3.10 se muestra los diseños más destacados del lobby.

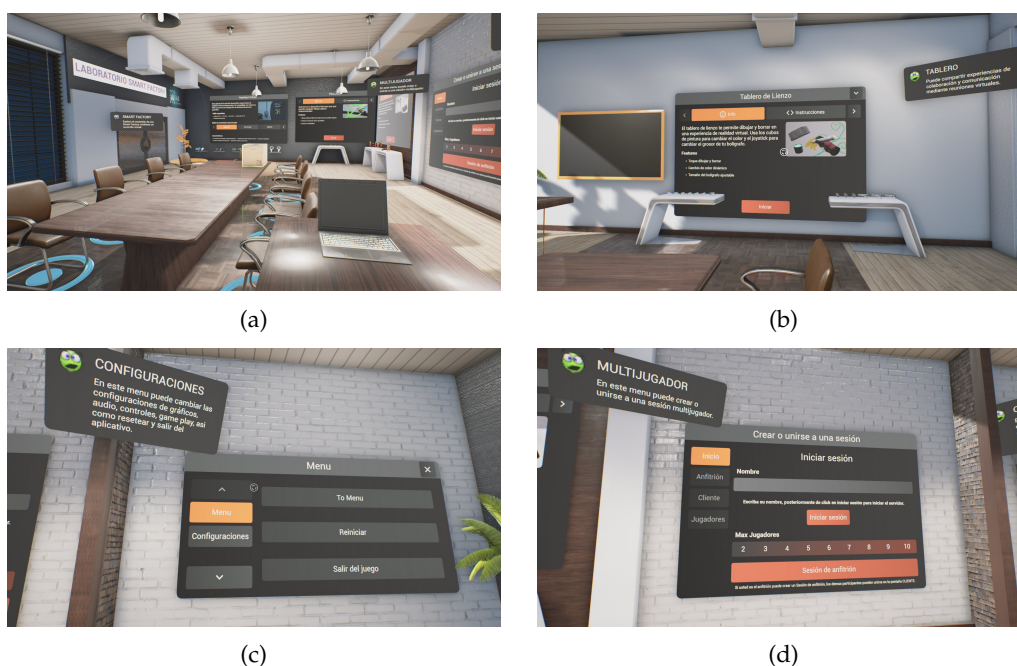


FIGURA 3.10: Diseño del nivel 1 Lobby. (a) sala de capacitación; (b) elementos interactivos de capacitación; (c) menú de configuraciones; (d) menú de multijugador.

Nivel 2: Zona externa

Este nivel incluye las siguientes representaciones 3D:

1. Terreno: se debe modelar el terreno de manera realista, teniendo en cuenta aspectos como la textura del suelo, la vegetación y las características topográficas.
2. Áreas verdes y paisajismo: se deben modelar las áreas verdes y elementos de paisajismo con un alto nivel de detalle, considerando aspectos como la iluminación y la interacción del usuario con los objetos.
3. Iluminación y señalización: se deben modelar los sistemas de iluminación y señalización con un alto nivel de detalle, considerando la interacción del usuario con los objetos y los efectos visuales que se desean lograr.

4. Instalaciones de servicios: se deben modelar las instalaciones de servicios de manera realista, considerando aspectos como la interacción del usuario con los objetos y los detalles técnicos de los sistemas.
5. Vallas y barreras: se deben modelar las vallas y barreras con un alto nivel de detalle, considerando aspectos como la interacción del usuario con los objetos y los efectos visuales que se desean lograr.
6. Edificios auxiliares: se deben modelar los edificios auxiliares con un alto nivel de detalle, incluyendo los interiores y los detalles arquitectónicos, para lograr una experiencia inmersiva y realista.

En la Figura 3.11 se muestra algunos diseños de la zona externa.

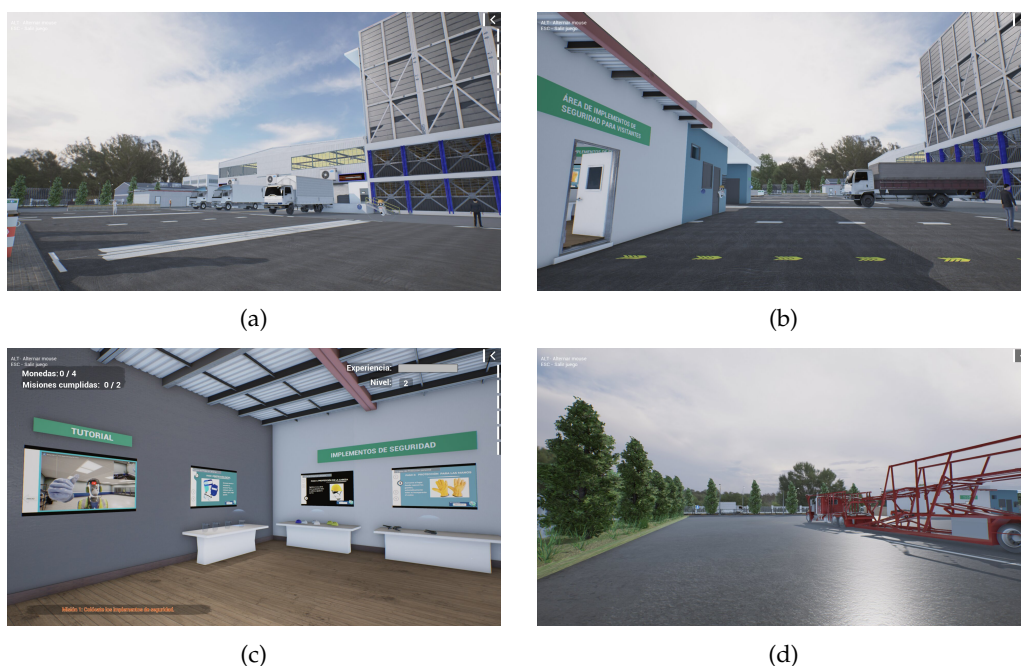


FIGURA 3.11: Diseño del nivel 2 zona externa. (a) entrada a la planta; (b) área de servicios; (c) área de seguridad industrial; (d) áreas verdes.

Nivel 3: Zona administrativa

Este nivel incluye las siguientes representaciones 3D:

1. Oficinas para la gestión de la planta: en estas oficinas se realizan actividades de coordinación y planificación de la producción, se llevan a cabo reuniones, se analizan informes y se toman decisiones.
2. Sala de control: es el lugar en el que se monitorea el funcionamiento de la planta, se reciben alertas de problemas en la producción y se toman decisiones para resolverlos. En la sala de control se pueden encontrar pantallas con información en tiempo real sobre el estado de los equipos y los procesos de producción.
3. Espacios para reuniones y capacitaciones: en la zona administrativa también pueden incluirse espacios para reuniones de equipos de trabajo y para la capacitación

de los empleados.

4. Áreas reuniones

en la Figura 3.12 se muestra algunos diseños de la zona administrativa.

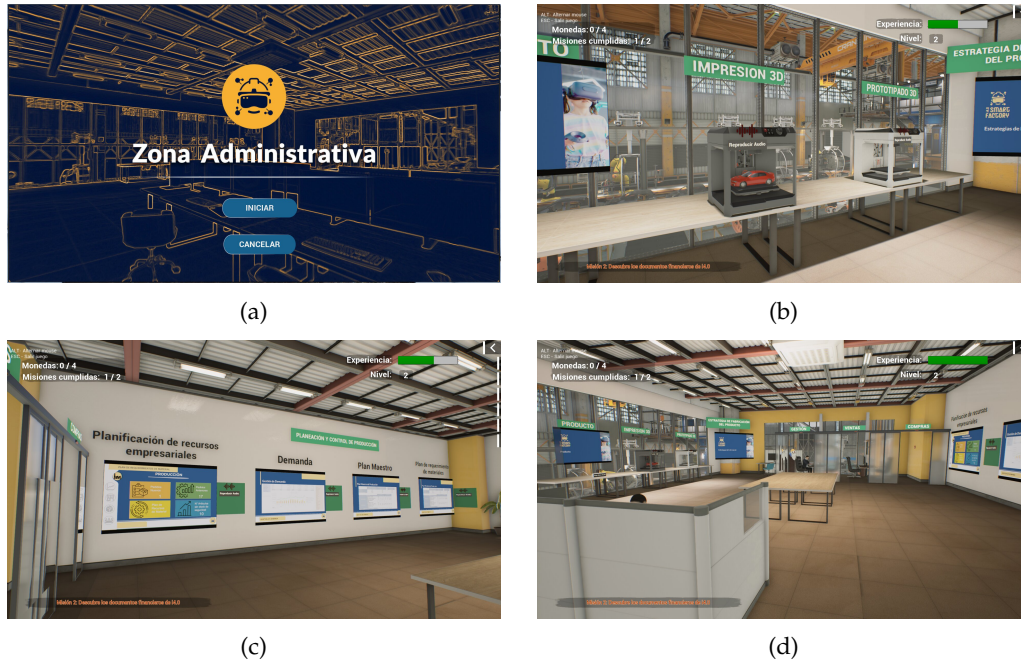


FIGURA 3.12: Diseño del nivel 3 zona administrativa. (a) pantalla de bienvenida; (b) área de prototipado; (c) área de sistemas de control; (d) demás áreas de la zona.

Nivel 4: Zona materia prima

Este nivel incluye las siguientes representaciones 3D:

1. El muelle de carga: es una zona donde los vehículos pueden cargar y descargar mercancías, ubicado a nivel del suelo o elevado, con plataformas y equipamiento como puertas seccionales, rampas, sellos de muelle, entre otros, para mantener la seguridad y la temperatura adecuada en la zona de carga y descarga.
2. El patio de maniobras: es el área ubicada en el exterior del almacén para maniobrar vehículos de transporte de carga y descarga, cerca del muelle de carga y diseñado para facilitar el acceso, evitar congestionamiento y permitir una circulación fluida.
3. Área de recepción: es el lugar en el que se reciben los materiales y se verifican que cumplan con las especificaciones requeridas.
4. El área de almacenamiento: es el espacio destinado a almacenar materiales, que pueden ser guardados en estanterías, tarimas o contenedores, y requieren ser manejados siguiendo normas de seguridad y procedimientos establecidos.
5. La zona de packing es el área donde se empacan los productos para su envío utilizando diferentes materiales de embalaje y operaciones como etiquetado,

clasificación y pesado de los paquetes para asegurar su llegada en buen estado al destino final.

6. El área de picking es donde se seleccionan los productos a enviar, utilizando sistemas de almacenamiento y equipos de manipulación de materiales para recogerlos de estantes o racks.
7. Sistemas de control de calidad: Estos sistemas pueden incluir inspecciones visuales, pruebas de calidad, verificación de cantidades y otros procedimientos de aseguramiento de calidad.

En la Figura 3.13 se muestra algunos diseños de la zona de materia prima.

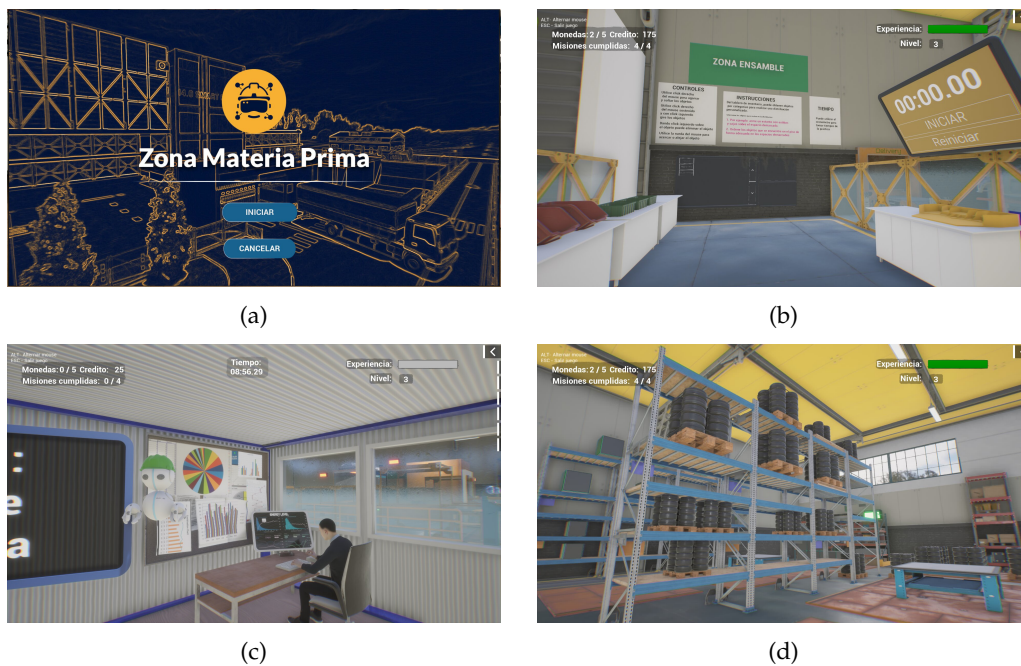


FIGURA 3.13: Diseño del nivel 4 zona de materia prima. (a) Pantalla de bienvenida; (b) área de selección; (c) área de control de la zona; (d) área de almacenamiento.

Nivel 5: Zona producción

Este nivel incluye las siguientes representaciones 3D:

1. Zona de soldadura es donde se une y suelda las piezas de metal que forman la estructura del automóvil.
2. Zona de pintura, se aplica la pintura y se seca para darle el acabado final a la carrocería del automóvil.
3. Zona de ensamblaje, se juntan las diferentes piezas del vehículo y se colocan en su posición final. En esta zona se ensamblan los motores, se conectan los sistemas de frenos, dirección y suspensión, y se colocan los interiores y accesorios.
4. Zona de prueba de calidad, se realizan pruebas para asegurar que el vehículo está funcionando correctamente y se cumplen los estándares de calidad y seguridad.

En la Figura 3.14 se muestra algunos diseños de la zona de producción.

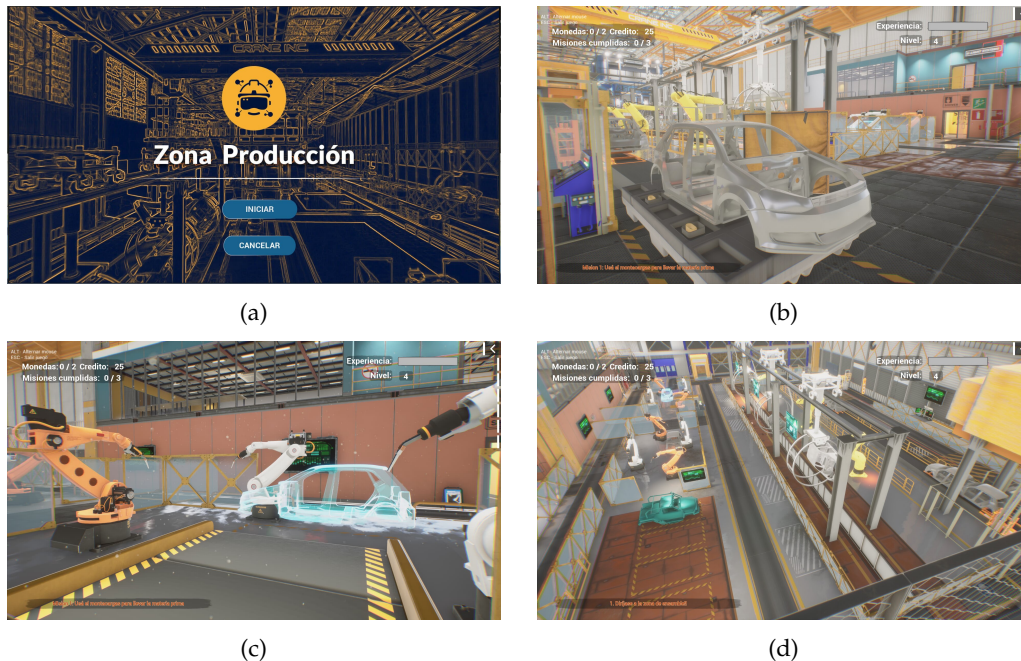


FIGURA 3.14: Diseño del nivel 5 zona de producción. (a) pantalla de bienvenida; (b) área de ensamble; (c) área de soldadura; (d) vista general de la zona.

Nivel 6: Zona de producto terminado

Este nivel incluye las siguientes representaciones 3D:

1. Espacio de almacenamiento: La zona de producto terminado tendrá suficiente espacio para almacenar los vehículos completados antes de su envío.
2. Sistemas de transporte: La zona de producto terminado también incluye sistemas de transporte para mover los vehículos desde la línea de producción hasta el área de almacenamiento. Esto incluye cintas transportadoras, grúas y otros equipos de manipulación de carga.
3. Inspección y pruebas: Los vehículos pueden ser inspeccionados y probados antes de ser enviados a la zona de producto terminado para asegurarse de que cumplen con los estándares de calidad requeridos.
4. Etiquetado y seguimiento: Cada vehículo en la zona de producto terminado puede etiquetarse y rastrearse para su seguimiento, lo que permite a la planta de producción tener un control eficiente sobre el inventario.

En la Figura 3.15 se muestra algunos diseños de la zona de producto terminado.



FIGURA 3.15: Diseño del nivel 6 zona de producto terminado. (a) pantalla de bienvenida; (b) área de almacenamiento; (c) área de control de producto terminado; (d) montacargas para transporte de materiales.

3.3.3. Aplicación de tecnologías de Smart Factory en el caso de estudio

El caso de estudio se desarrolló bajo un enfoque de *Smart Factory*, el cual considera sistemas inteligentes basados en la integración de los sistemas de automatización e información, y sistemas modulares para trabajar en la personalización de productos. De esta manera, se consideró para el caso de estudio acoplar la implementación de las principales tecnologías que integran una *Smart Factory*. La Tabla 3.3 describe 12 tecnologías de la industria 4.0 que han sido seleccionadas para poder integrarlas en la fábrica virtual del caso de estudio, con el objetivo de utilizarlas en la experimentación de enseñanza aprendizaje en *Smart Factory*.

Tecnologías	Aplicaciones en Smart Factory
Identificación por radiofrecuencia (RFID)	Sensores, actuadores y RFID integrados en las máquinas.
Sistemas ciberfísicos (CPS)	Dispositivos inteligentes para monitorear y controlar en tiempo real todos los procesos.
Big data y análisis de datos (BD)	Gestión y análisis de grandes bases de datos de los sistemas de producción.
Computación en la nube	Almacenamiento y análisis de datos en la nube en tiempo real desde cualquier parte del mundo.
Interfaz hombre-máquina (HMI)	Interacción entre hombre máquina mediante el uso de Interfaces y monitores.

Sistema de ejecución de fabricación (MES)	Control de los principales procesos de producción mediante conexión en tiempo real de sistemas de información.
Gestión de mantenimiento asistida por ordenador (CMMS)	Mantenimiento de maquinaria y equipos.
Plataformas de colaboración	Integración de diferentes plataformas en tiempo real.
Realidad aumentada, realidad virtual y simulación	Uso de estas herramienta para la formación y entrenamiento de usuarios.
Inteligencia artificial (IA)	Aplicación de la IA en los principales recursos y procesos de la planta de producción como Personas, máquinas, instalaciones, etc.
Gemelo digital	Representación de los sistemas que conforman la fábrica real a fábrica virtual simulada por ordenador.
Robótica colaborativa	Integración de distintos tipos de robots para trabajar operaciones repetitivas en los procesos de producción.

TABLA 3.3: Aplicación de tecnologías de Smart Factory en el caso de estudio.

La aplicación del estudio de caso de fábrica virtual involucró la integración de varias tecnologías, tal como se describe en la Tabla 3.3. Entre ellas se incluyen el gemelo digital, la inteligencia artificial, la realidad virtual de computación en la nube y la simulación. Algunas de estas tecnologías se aplicaron directamente en los procesos productivos, mientras que otras, tales como big data, data analytics, plataformas colaborativas y sistema de ejecución de manufactura, se integraron a través de representaciones visuales y gestión adaptada. Esta integración tecnológica permitió una optimización de los procesos productivos, una mejora en la eficiencia y la flexibilidad de la producción.

De acuerdo con las necesidades del proceso productivo y las características de la maquinaria y el área de la planta, se integraron las demás tecnologías en los procesos de la planta productiva. Para ilustrar gráficamente la aplicación de la fábrica virtual con realidad virtual y su funcionamiento acorde al *framework* y tecnologías de la Industria 4.0, se muestran en la siguiente Figura 3.16.

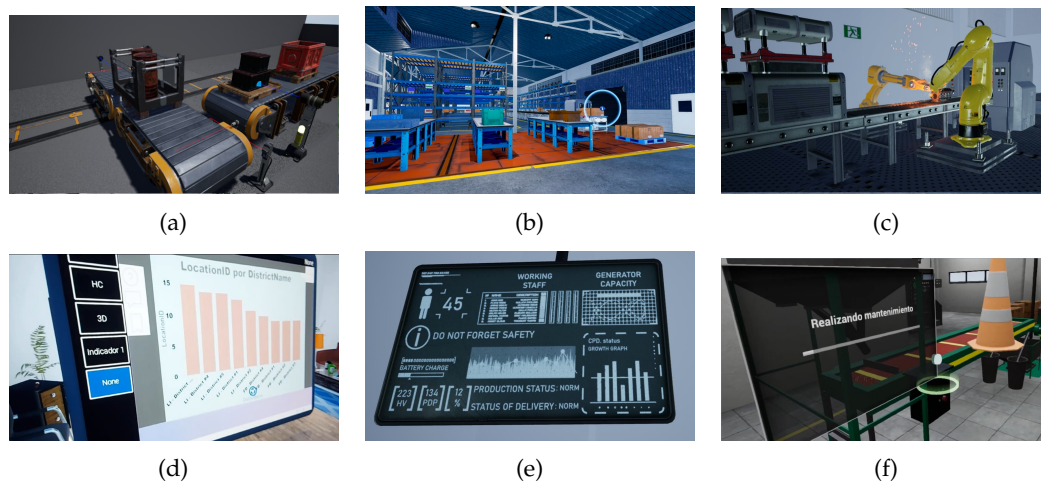


FIGURA 3.16: Aplicación de algunas tecnologías de la Industria 4.0 en el caso de estudio: (a) sensores, actuadores e identificación por radiofrecuencia en transportadores; (b) representación realista de un sistema de almacenamiento utilizando un gemelo digital; (c) robots autónomos trabajando en colaboración en tareas repetitivas; (d) big data y análisis de datos en tiempo real en el proceso; (e) interfaz hombre-máquina con interfaces y monitores; (f) mantenimiento de maquinaria y equipo.

3.4. Conclusiones

El diseño de entornos virtuales 3D es importante en la realidad virtual y el metaverso por las siguientes razones:

El proyecto *Digital Factory Metaverse* ha sido desarrollado utilizando una metodología basada en el diseño modular y de *Smart Factory*. Para ello, se llevó a cabo un estudio de ingeniería básica con el fin de determinar los aspectos clave de una *Smart Factory* en cuanto a sus sistemas de producción y logística. Asimismo, se emplearon software especializados de diseño 3D para incluir las características personalizadas de la planta de producción y, finalmente, se completó el proyecto con el software Unreal engine.

Este proyecto ofrece una forma innovadora y tecnológica para diseñar y planificar plantas de producción, lo que puede resultar en una mayor eficiencia y productividad en la industria. Además, el uso de tecnologías de realidad virtual y metaverso puede mejorar significativamente la colaboración y comunicación entre los miembros del equipo y los clientes, lo que puede reducir los costos y los tiempos de producción. En definitiva, el proyecto *Digital Factory Metaverse* representa una solución creativa y avanzada para la industria que promete cambiar la forma en que se diseñan y construyen las plantas de producción en el futuro.

El diseño de entornos virtuales 3D colaborativos es fundamental para la realidad virtual y el metaverso, ya que permite una experiencia más inmersiva, una interacción fluida con el usuario y la creación de experiencias únicas que no son posibles en el

mundo real. Además, los entornos virtuales también son importantes para la comunicación y la colaboración entre usuarios que no se encuentran en el mismo lugar físico, lo que los convierte en una herramienta relevante para el trabajo y la colaboración en línea. En definitiva, el diseño de entornos virtuales 3D es crucial para aprovechar al máximo las posibilidades que ofrecen la realidad virtual y el metaverso.

Desarrollo de un Framework para realidad virtual basado en colaboración

Este capítulo es objeto de la siguiente publicación:

L. O. Alpala et al. *Smart Factory using virtual reality and online multi-user: Towards a metaverse for experimental Frameworks*. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no 12, p. 6258.

<https://doi.org/10.3390/app12126258>

4.1. Motivación

En la actualidad, las aplicaciones de realidad virtual aprovechan la amplia interactividad en un entorno virtual pero sin consecuencias frente al mundo real, con el fin de optimizar los programas de capacitación y formación en empresas e instituciones educativas. Por ello, el propósito principal de este trabajo fue mejorar las prácticas de colaboración y comunicación en mundos virtuales 3D con realidad virtual y metaverso orientados al sector educativo y productivo.

En este sentido, en este capítulo se propone la creación de un *framework* experimental desde una primera aproximación que represente un avance significativo en la formalización de la colaboración y comunicación en realidad virtual. Este *framework* se concibe como una estructura sólida y adaptable que busca establecer un marco conceptual y tecnológico para fomentar interacciones inmersivas y colaborativas en el ámbito virtual. Al desarrollar este *framework*, se pretende superar las limitaciones actuales y explorar nuevas posibilidades en cuanto a la interacción humana, la comunicación y la colaboración en estos entornos emergentes.

El sistema de *framework* se ha desarrollado con el motor gráfico Unreal Engine y estará equipado con diferentes componentes funcionales, configuraciones orientadas a

objetos, interfaces fáciles de usar y una plataforma multiusuario en línea para conectar a los usuarios desde diferentes partes del mundo. Además, se ha propuesto el desarrollo de una plataforma de realidad virtual y metaverso que funciona como complemento a proyectos realizados con el *framework*.

4.2. Desarrollo de un framework basado en la realidad virtual y metaverso

En esta sección se describe el desarrollo de un *framework* para un sistema de realidad virtual y metaverso como propuesta para crear proyectos de entornos virtuales 3D multiusuario en línea. El *framework* cuenta con una estructura de carpetas predefinidas e internacionalizadas en idioma inglés que pueden ser utilizadas como base para cualquier proyecto, permitiendo una organización fácil y accesible incluso en proyectos de gran tamaño. En este sentido, el motor de desarrollo de juegos Unreal Engine 5 (UE5) en su versión 5.03 se utilizó para el desarrollo.

En la actualidad, existen diversos motores de desarrollo gráfico disponibles en el mercado, entre los cuales destacan dos opciones populares: *Unity3D* y *UE5* [77]. Ambos motores ofrecen capacidades sólidas para el desarrollo de proyectos, sin embargo, para esta investigación se ha optado por utilizar *UE5* como la herramienta principal debido a su gran potencial y a las herramientas y complementos oficiales disponibles.

UE5 permite diseñar y desarrollar proyectos con una calidad similar a los juegos AAA (término utilizado para referirse a videojuegos de alta calidad y producción), lo que brinda a los usuarios una experiencia inmersiva y realista. Además, dentro de la plataforma de *UE5* se ofrece soporte específico para la realidad virtual, lo que facilita la creación de entornos virtuales compatibles con esta tecnología [78].

4.2.1. Originalidad del Framework

En la revisión de antecedentes realizada, se encontró información limitada sobre el desarrollo de sistemas de *framework* basados en realidad virtual y metaverso. Algunas investigaciones, como la referenciada en [7], han mostrado la implementación de sistemas basados en el motor Unity, donde se aplica la realidad virtual en casos específicos. Por otro lado, en [8], [9], [10], y [11] proponen desarrollos de mundos virtuales, basados en simulaciones para entornos 3D. Sin embargo, estos sistemas integran solo ciertas partes de colaboración y su representación no se basa completamente en realidad virtual y metaverso, limitándose únicamente a entornos virtuales 3D para ordenador de escritorio.

De acuerdo con lo anterior, la propuesta del *framework* en esta investigación busca mejorar los *framework* que se basan únicamente en la plataforma de Windows 64 bits, y ampliarlo para incluir plataformas especiales con realidad virtual y metaverso. Además de permitir la colaboración y comunicación en tiempo real, este *framework* también proporcionará un alto grado de inmersión gracias a su calidad gráfica.

El desarrollo del *framework* en UE5 se ha estructurado como se muestra en la Figura 4.1. Para ello, primero se ha realizado la creación de una plantilla general del proyecto. En segundo lugar, se han creado diferentes áreas de trabajo para montar los proyectos posteriores. En tercer lugar, se ha creado un contenido formado por diferentes carpetas basadas en la estructura general del *framework* con sus funciones. Por último, en cada función se han organizado las principales sub carpetas con sus archivos de trabajo para que funcionen de forma organizada, el contenido de las carpetas será detallado más adelante con la descripción del *framework*.

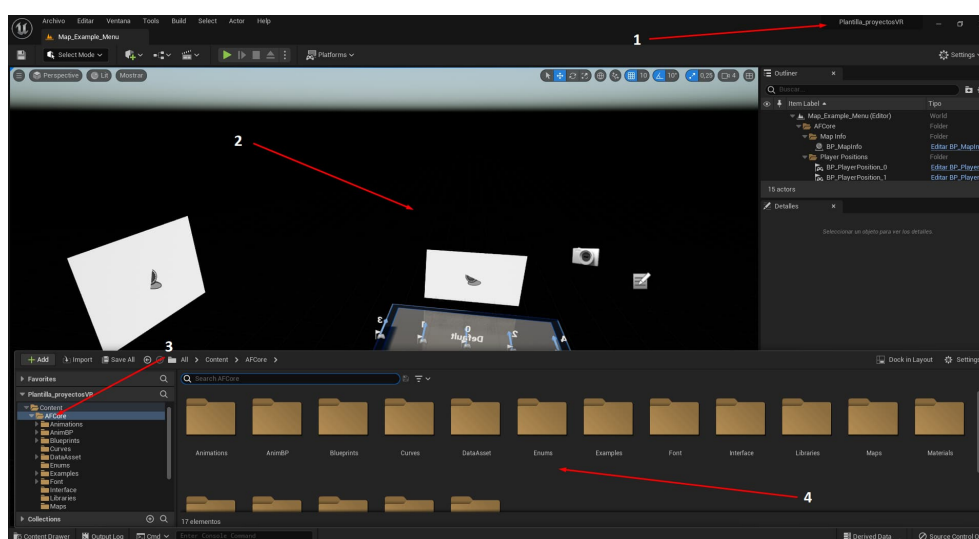


FIGURA 4.1: Estructura del desarrollo del Framework en UE5.

A continuación se presenta una primera aproximación al desarrollo del sistema del *framework* de realidad virtual y metaverso en una versión 2.0, donde se han integrado funciones importantes, como se ilustra en la Figura 4.2. Este sistema consta de varios componentes que permiten el correcto funcionamiento de la realidad virtual y posibilitan experiencias inmersivas. Para esta investigación, se ha desarrollado un primer avance, el cual funciona como el sistema principal al cual se le podrán agregar posteriormente nuevas funcionalidades.

Para el desarrollo del *framework*, se ha seguido la documentación proporcionada por Epic Games [79], así como la utilización de plantillas gratuitas de la misma tienda de Epic Games, de las cuales se adaptaron componentes de realidad virtual para el *framework*. Además, algunos plugins de la tienda de Epic Games se utilizaron como complemento a las funciones desarrolladas.

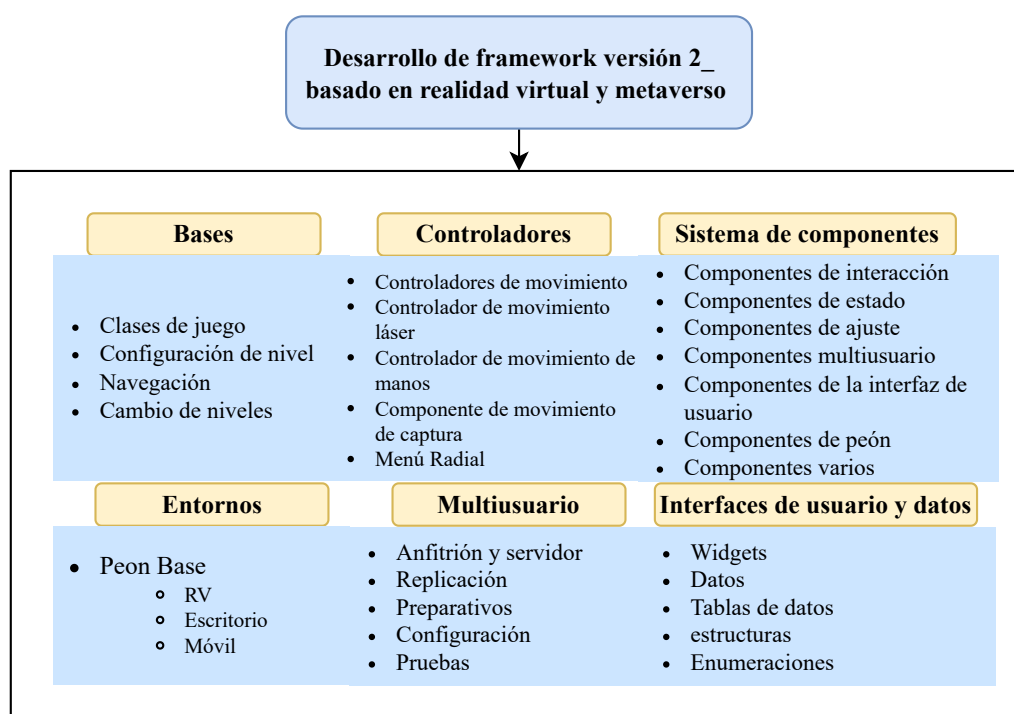


FIGURA 4.2: Propuesta de framework experimental de sistema realidad virtual.

4.2.2. Componentes del Framework

A continuación, se describen los componentes del *framework*.

4.2.2.1. Bases

En esta función se desarrollaron aspectos como las clases del aplicativo, configuración de los niveles, navegación y cambio de niveles.

- *Clases del aplicativo*: En el sistema, las clases son esenciales para el funcionamiento básico, como las transiciones de nivel y la navegación de los peones. La instancia de juego es única, ya que mantiene su estado después de un cambio de nivel y puede almacenar datos persistentes, como el lenguaje, los gráficos y la configuración de audio, además de los *data assets* del nivel actual. Las estadísticas del jugador son útiles para la gestión de información sobre cada usuario en entornos multiusuario.
- *Configuración de niveles*: En el desarrollo de proyectos con el *framework*, se utiliza un mapa principal que contiene todos los elementos y recursos necesarios para cargar cada nivel. Además, para garantizar el funcionamiento óptimo del *framework*, es imprescindible colocar y configurar adecuadamente diversos actores clave en cada nivel. Estos actores son esenciales para la creación de entornos virtuales 3D inmersivos y para asegurar una experiencia de usuario satisfactoria.

- *Navegación*: El sistema de teletransporte es esencial para la experiencia en realidad virtual, ya que el movimiento normal puede provocar mareos. Los elementos de navegación del *framework* están conectados a este sistema de teletransporte, el cual sirve principalmente para restringir las zonas a las que el usuario puede teletransportarse. En la realidad virtual, se utiliza un actor plano con un componente de teletransporte y se seleccionan los componentes con posibles métodos de interacción.
- *Cambio de niveles*: El *framework* proporciona mecanismos para cargar y cambiar niveles de manera fluida. Para esta función, se incluye un nivel de introducción completamente configurado que contiene una pantalla de introducción, la posición del jugador, un actor de información del mapa y una esfera del cielo. La transición del objeto se genera de forma automática y se completa con el contenido indicado en el *data asset* del nivel correspondiente, abriéndose cada vez que se carga un nuevo nivel.

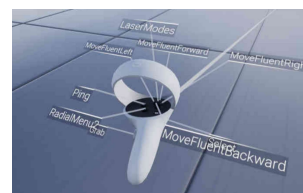
4.2.2.2. Controladores

En Unreal Engine, los controladores en realidad virtual se utilizan para permitir la interacción del usuario con el entorno virtual. Estos controladores son dispositivos físicos, como los mandos de movimiento o los guantes hápticos, que se utilizan para manipular objetos virtuales y realizar acciones dentro del mundo virtual.

Unreal Engine ofrece soporte integrado para una amplia variedad de controladores de realidad virtual, como Oculus Touch, HTC Vive Controllers, Valve Index Controllers y Windows Mixed Reality Controllers. Estos controladores se pueden configurar y utilizar dentro del motor para crear interacciones intuitivas y realistas.

Para implementar el control de los controladores en el *framework*, la Tabla 4.1, describe los diversos estilos de controladores con sus correspondientes funcionalidades, de acuerdo con el esquema representado en la Figura 4.2.

Controladores	Función
Controladores de movimiento	Están diseñados para representar a los Controladores físicos en las experiencias de realidad virtual. Cada controlador consta de un controlador de movimiento y varios componentes de movimiento.



<p>Controlador de movimiento láser</p>	<p>Incorpora al mando de movimiento un láser (implementado como componente de movimiento) como medio principal de interacción con otros jugadores. El componente de movimiento láser une un puntero láser al controlador que emite un haz de luz láser, lo que brinda al jugador la oportunidad de interactuar de manera remota.</p>	
<p>Controlador de movimiento de las manos</p>	<p>Permite que el controlador de movimiento aparezca con una malla esquelética de una mano. Sin embargo, el controlador de movimiento de la mano sirve fundamentalmente como clase principal para todos los controladores de movimiento de la mano.</p>	
<p>Componente de movimiento de agarre</p>	<p>Permite que el control de movimiento agarre o sujete a los actores. Cuando las manos de la realidad virtual intentan agarrar o sujetar a un actor, la mano busca conectores en la malla del actor y coincide con el receptor más apropiado del control de movimiento.</p>	
<p>Menú radial</p>	<p>El componente de movimiento de menú radial genera un conjunto circular de botones que se pueden seleccionar con el pulgar de la misma mano o con el láser de la otra mano. El menú radial es una interfaz de usuario solo para realidad virtual.</p>	

TABLA 4.1: Estilos de los controles en realidad virtual.

4.2.2.3. Sistema de componentes

Para proporcionar las funcionalidades requeridas, los componentes pueden ser adjuntados a clases de actores e instancias de clases de actores. Esto permite la personalización del actor sin la necesidad de construir una complicada jerarquía de clases, y permite el intercambio libre de componentes. Los componentes que se crean para la aplicación pueden ser categorizados según su funcionalidad principal. En la Figura 4.3 se muestra la organización de los componentes para el *framework*:

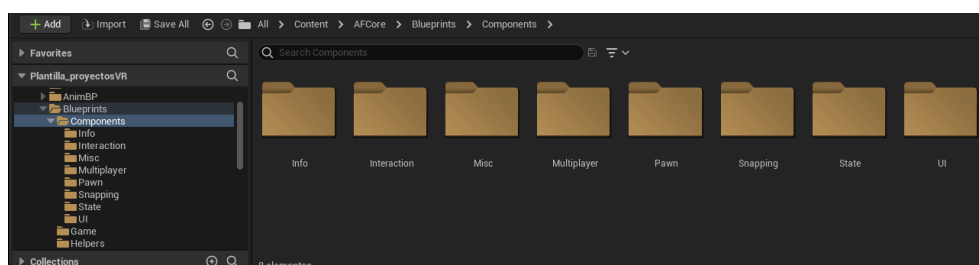


FIGURA 4.3: Sistema de componentes por carpetas en el framework.

- *Componentes de interacción*: Estos componentes permiten la interacción del jugador con los actores de la aplicación, incluyendo la selección, la captura y otros aspectos. Por ejemplo, un componente de interacción podría permitir que el jugador recoja un objeto en el mundo virtual.
- *Componentes de estado*: Estos componentes aplican, inician y reproducen los cambios de estado para el actor propietario.
- *Componentes de ajuste*: Cumplen con todos los requisitos necesarios para que los actores encajen en su posición después de ser liberados por un jugador.
- *Componentes multiusuario*: Agrupan un conjunto de herramientas útiles para la gestión de múltiples usuarios.
- *Componentes de la interfaz de usuario*: Abarca el diseño, la visualización y el contenido de los elementos de la interfaz de usuario.
- *Componentes del peón*: Estos componentes proporcionan al peón funciones como los controles. Por ejemplo, un componente de peón puede permitir que el jugador se mueva por el mundo virtual.
- *Componentes varios*: Comprenden un conjunto de componentes útiles que se ejecutan en segundo plano para permitir una funcionalidad avanzada.

4.2.2.4. Entornos

El *framework* se basa en una jerarquía de clases de peones que proporciona personalización para los diferentes entornos admitidos por el *framework*, incluyendo el escritorio, realidad virtual y dispositivos móviles, en UE5 se ha estructurado como se muestra en la Figura 4.4.

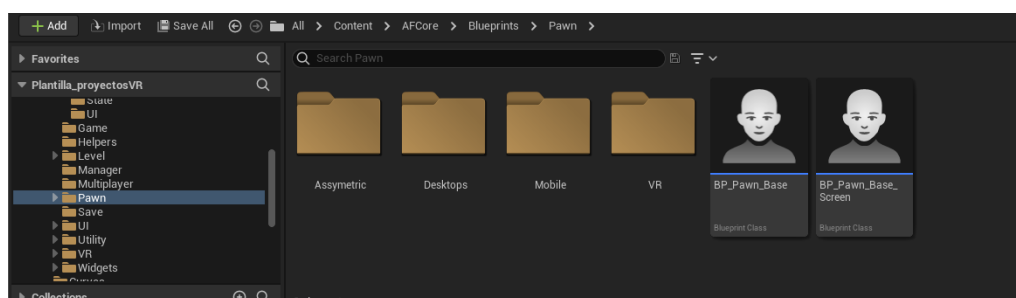


FIGURA 4.4: Estructura de entornos en el framework.

El peón de realidad virtual se diferencia de las demás clases de peones por las características específicas que requiere el entorno de realidad virtual. Durante el inicio de la aplicación, el controlador del jugador analiza el entorno de la experiencia y selecciona el peón apropiado en el archivo de información del nivel correspondiente. El peón de realidad virtual debe cumplir con ciertos criterios para proporcionar una experiencia inmersiva y cómoda al jugador. Además, su diseño debe ser intuitivo y fácil de manejar para que el usuario pueda controlar sus acciones de manera efectiva. Los criterios que se utilizan son los siguientes:

- La capacidad de moverse sin provocar mareos en el jugador.
- La capacidad de interactuar con el entorno virtual y sus elementos.
- La capacidad de ajustar el tamaño y la posición del jugador en función del escenario virtual.

4.2.2.5. Multiusuario

La creación de una aplicación multiusuario es un proceso complejo que implica enfrentar diversos desafíos que exceden el alcance del *framework*. En consecuencia, para configurar una aplicación en línea en modo multiusuario, es necesario abordar la replicación y las interfaces adecuadas para crear y unirse a sesiones de manera efectiva. Es importante destacar que la función de multiusuario desarrollado en esta investigación, como se muestra en la Figura 4.5 es un aspecto clave para la colaboración y comunicación en metaverso, ya que permite que los diferentes usuarios compartan la misma información y realicen acciones simultáneas en el mismo entorno virtual, las funciones creadas en multiusuario son una primera aproximación en el *framework* por lo que se realizarán mejoras para garantizar mayor colaboración en metaverso.

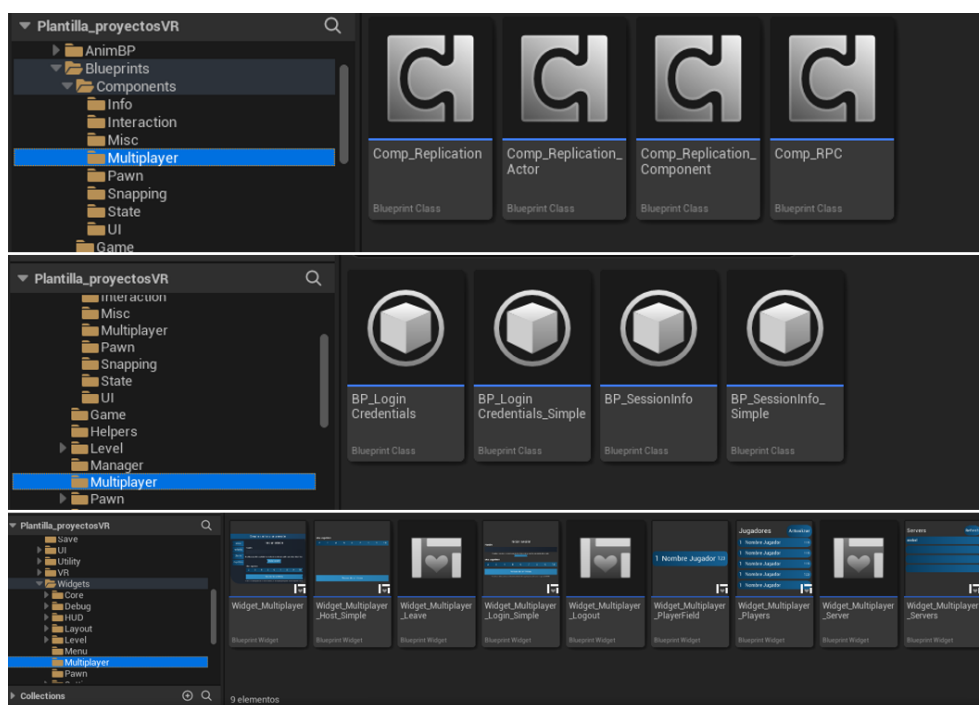


FIGURA 4.5: Funciones más importantes de desarrollo para multiusuario.

Se describe, a continuación, algunas de las funciones multiusuario:

- *El host y el servidor:* para la funcionalidad multiusuario se utilizaron dos plugins externos: el plugin central de EOS, que se utiliza para proporcionar servicios en línea para el proyecto, y el plugin de Vivox, que permite la comunicación de voz en tiempo real entre múltiples usuarios.
- *Replicación:* La replicación es un aspecto fundamental en el desarrollo de aplicaciones multiusuario en el ámbito de la realidad virtual. En este sentido, resulta necesario replicar todos aquellos actores cuyo estado, posición u otras propiedades sean relevantes para el correcto funcionamiento del sistema. De este modo, se logra una adecuada sincronización entre los distintos usuarios que forman parte de la sesión.
- *Preparativos y configuración:* para que la aplicación funcione en línea, es necesario configurar y registrar los plugins externos en el portal para desarrolladores de Epic Games. Esto incluye la creación de una cuenta de desarrollador, la creación de un producto, la configuración de los servicios de la cuenta de Epic, la configuración P2P y la revisión de los detalles del producto.
- *Pruebas de funcionalidad:* Al haber seguido las configuraciones adecuadas, es posible poner a prueba la funcionalidad del modo multiusuario con usuarios de cualquier parte del mundo. Al iniciar el modo multiusuario, se presentan diversas posibilidades que detallamos a continuación:

1. Organización de sesiones: se crea automáticamente una sesión que se añade a la lista de sesiones disponibles.
2. Actualización de la lista de sesiones: si existe una sesión alojada, pero no se muestra en la lista, es posible actualizarla para que los usuarios puedan verla y unirse a ella.
3. Unión a una sesión: al unirse a una sesión, el sistema genera automáticamente el peón del jugador en una de las posiciones iniciales de dicha sesión.

Para garantizar un correcto funcionamiento, es necesario que todos los usuarios utilicen la misma versión del aplicativo de proyecto empaquetado con el mismo contenido en todos los dispositivos. Asimismo, es imprescindible que todos los dispositivos (ordenadores y HMD) se encuentren conectados a internet, lo que permitirá establecer conexiones en tiempo real desde cualquier parte del mundo sin restricciones adicionales.

Colaboración y comunicación multiusuario con enfoque de metaverso

Resaltamos la colaboración en equipo a través del empleo de un entorno virtual 3D con conectividad a Internet con el fin de respaldar la toma de decisiones en actividades específicas, diseñadas para practicar y entrenar de forma inmersiva. En consonancia con el concepto de metaverso, el *framework* de trabajo diseñado establece que la colaboración en equipo debe ser efectiva tanto a nivel individual como colectivo [80].

La realidad virtual se ha utilizado para crear un entorno virtual 3D que permite la colaboración en equipo, así como la integración de diferentes aplicaciones multimedia. La capacidad del entorno para personalizar la configuración es también una característica relevante según la investigación realizada por [81]. Para evaluar la colaboración en equipo en el entorno virtual 3D, se consideraron tres capacidades, identificadas por [80]: presencia, realismo e interactividad. En cuanto a la presencia, el entorno virtual desarrollado en este estudio ofrece una experiencia inmersiva a través de pistas visuales, sonidos, textos y simulaciones relevantes. El realismo se ha conseguido a través de la integración de imágenes y componentes hiperrealistas. Por último, la interactividad permite una navegación en tiempo real en todo el entorno virtual creado.

Modo multiusuario de la aplicación Metaverso basado en avatares

Se implementó un procedimiento para utilizar el contenido del metaverso en modo multiusuario en línea a pequeña escala (ver Figura 4.6a), el cual permitió que la aplicación se ejecute sin contratiempos a través de un servidor en la nube de Epic Games para UE5 durante las sesiones en línea con los usuarios. La Figura 4.6b ilustra el modelo de colaboración basado en avatares implementado en el entorno virtual, en el cual cada avatar puede adaptarse al entorno virtual mediante la modificación de sus nombres, esto último todavía en desarrollo.

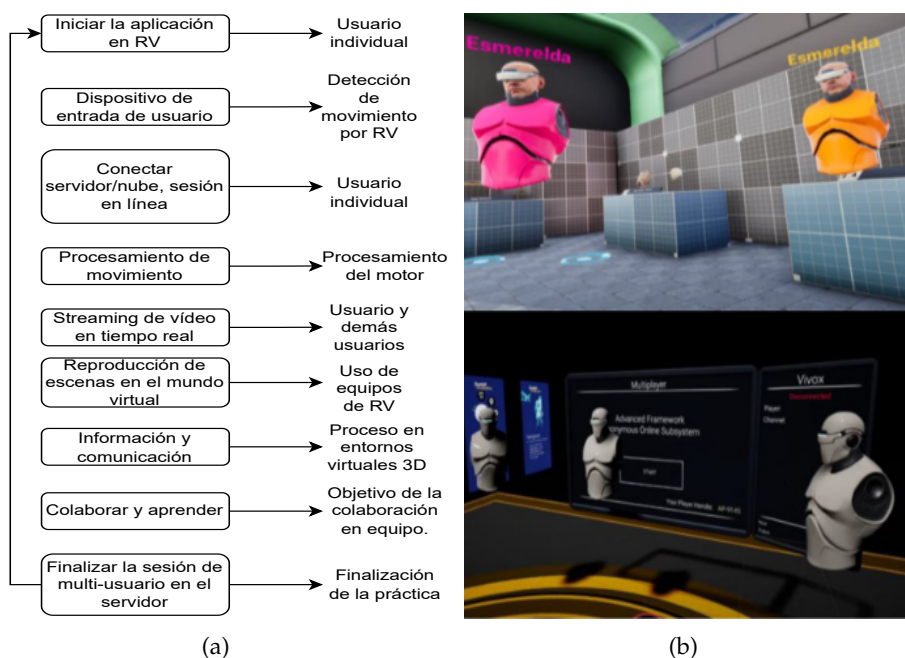


FIGURA 4.6: Modo multiusuario de la aplicación basado en avatares: (a) proceso de inicio de sesión en metaverso; y (b) representación de avatares en el mundo virtual.

Interfaz de inicio de sesión multiusuario

La interfaz de inicio de sesión multiusuario permite la identificación y autenticación de los usuarios, garantizando un acceso seguro y controlado al espacio virtual. Además, facilita la personalización y persistencia de datos, permitiendo a los usuarios acceder a sus perfiles personalizados y mantener sus preferencias y avatares en diferentes sesiones. En la Figura 4.7 se muestra el diseño de la interfaz multiusuario realizada en UE5 para el modo anfitrión, cliente y jugadores.



FIGURA 4.7: Interfaz de inicio de sesión multiusuario.

Esta interfaz también fomenta las interacciones sociales y colaborativas, al permitir que los usuarios se comuniquen y colaboren entre sí en proyectos conjuntos. Asimismo, la gestión de derechos y permisos se vuelve posible, lo que ayuda a proteger la propiedad intelectual y regular el acceso a recursos específicos.

4.2.2.6. Interfaces de usuario y gestión de datos en el Framework

El *framework* ofrece una amplia variedad de interfaces de usuario para visualizar información y numerosas opciones para que el usuario interactúe con la experiencia de forma personalizada. Entre las opciones disponibles se encuentran una interfaz de usuario basada en widgets, así como el Heads Up Display (HUD), la ventana de información y las paletas. A continuación, describimos con más detalle estas funcionalidades:

- **Widgets:** Los widgets son los elementos visuales que conforman la aplicación, como imágenes, texto, botones, interacciones y personalización adaptada a los escenarios virtuales. En Unreal Engine es la interfaz gráfica de usuario que permite interactuar con los principales elementos gráficos construidos para visualizar la información del aplicativo.
- **Datos:** Los data assets son esenciales para el correcto funcionamiento de una aplicación, ya que permiten almacenar, organizar y acceder eficientemente a información diversa. El *framework* ofrece diferentes tipos de recursos de datos, entre los que se incluyen: tablas de datos, que se organizan por filas y se les asigna una clave para apuntar a la celda de la tabla que proporciona el texto a mostrar en el widget; estructuras que estandarizan el texto traducible y la comunicación entre componentes, algunas son generadas automáticamente y otras se utilizan específicamente en la configuración de componentes; y enumeraciones que proporcionan una lista modificable de teclas que pueden cambiar funciones o mostrarse en diferentes partes de la aplicación. Estos recursos de datos proporcionados por el C ayudan a facilitar la gestión y organización de la información en la aplicación.

4.3. Propuesta de metodología para trabajar proyectos de realidad virtual

Se ha propuesto una metodología para el diseño y desarrollo de sistemas de realidad virtual, específicamente adaptada para abordar los desafíos asociados con la realidad virtual y los metaversos. Esta metodología se fundamenta en el enfoque presentado por [82] y se complementa con el desarrollo y aplicación del *framework*.

La metodología se estructura en cuatro fases principales: concepto, preproducción, producción y postproducción. En la fase de concepto, se plantea la idea central del proyecto y se elabora un documento de diseño que define los objetivos, requisitos y características principales del sistema de realidad virtual. La preproducción implica la planificación de recursos, la definición de tareas y la elaboración de un plan de desarrollo detallado. Durante la fase de producción, se lleva a cabo la implementación

del sistema utilizando el *framework* propuesto, dando vida a la experiencia de realidad virtual y metaverso. Por último, en la fase de postproducción, se realizan pruebas exhaustivas y se implementan diferentes versiones del sistema, verificando el funcionamiento del modo multiusuario en el metaverso y garantizando la calidad y estabilidad del proyecto.

La Figura 4.8 ilustra gráficamente las diferentes fases que conforman esta metodología, brindando una guía estructurada y completa para el desarrollo de proyectos de realidad virtual y metaversos. A través de esta metodología, se busca asegurar un enfoque coherente y eficiente en todas las etapas del desarrollo, desde la concepción de la idea hasta la implementación final del sistema. Esto permite maximizar la calidad y el rendimiento del proyecto, así como garantizar la satisfacción de los usuarios y la consecución de los objetivos planteados.

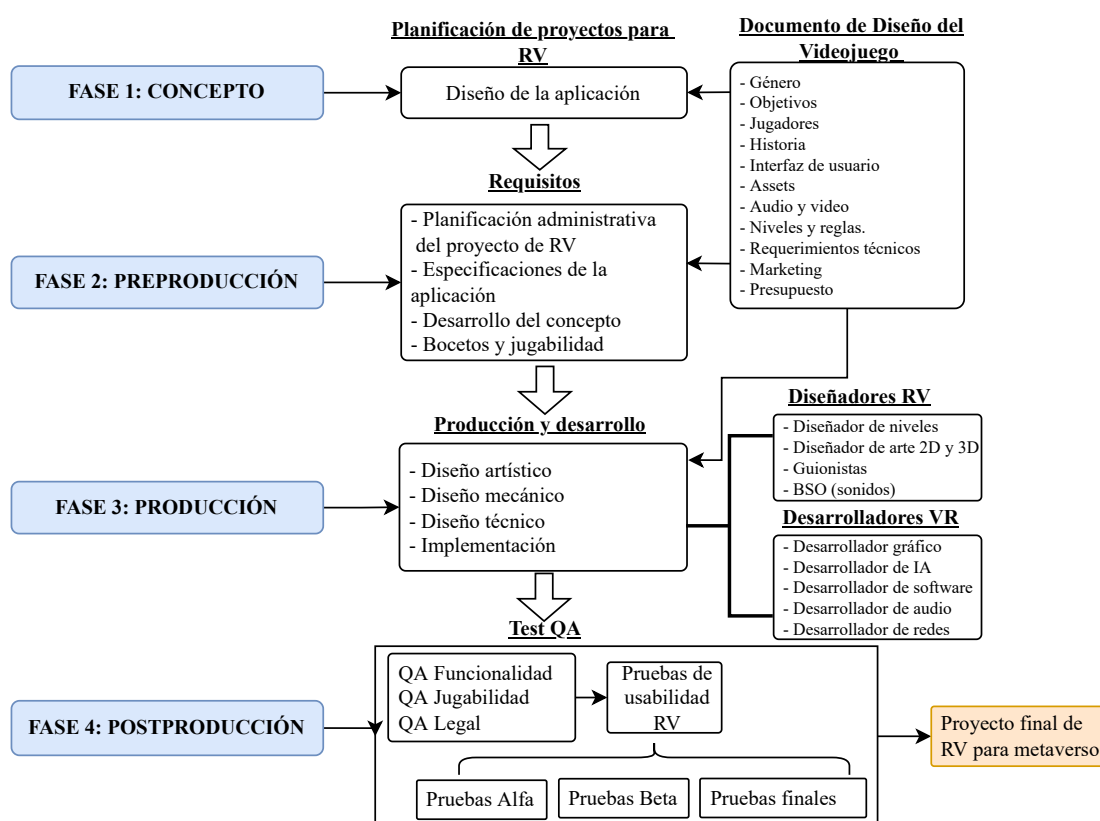


FIGURA 4.8: Metodología de desarrollo de proyectos en realidad virtual.

Las fases de la metodología se describen a continuación:

- Fase 1 - Concepto: En esta fase, se plantea la idea inicial del proyecto y se registra toda la planificación respaldada por un Documento de Diseño del Juego (GDD). El GDD incluye los aspectos técnicos más importantes del proyecto, como los objetivos, la mecánica del juego, la narrativa, los requisitos técnicos y las limitaciones. Se realiza un análisis exhaustivo del concepto y se definen los principales

elementos que conformarán la experiencia de realidad virtual y metaverso. Esta fase sienta las bases para el desarrollo del proyecto, estableciendo la visión general y los criterios que guiarán las etapas posteriores.

- Fase 2 - Preproducción: En esta fase, se lleva a cabo una planificación detallada que abarca los requisitos y recursos necesarios para iniciar el proyecto. Se identifican las herramientas y tecnologías específicas que se utilizarán, se definen las especificaciones técnicas y se establecen los hitos y plazos de seguimiento. Además, se inicia el desarrollo del concepto, realizando bocetos previos y diseño del juego. Se construye y redacta el documento GDD, el cual se actualiza y amplía con los aspectos más relevantes que surgen durante la preproducción. En esta fase, se establece una base sólida para el desarrollo futuro, asegurando que se cuente con los recursos necesarios y una clara comprensión de la dirección que tomará el proyecto.
- Fase 3 - Producción: En esta etapa, se lleva a cabo la creación del sistema de realidad virtual utilizando el framework desarrollado. Se implementan las funcionalidades principales y se construyen los entornos virtuales y los elementos interactivos. Durante esta fase, se consideran aspectos como el tiempo y los recursos necesarios, los cuales dependen del tamaño del proyecto y las necesidades particulares del sector en el que se aplicará el sistema. Se realiza una integración continua de las diferentes partes del proyecto y se lleva a cabo un seguimiento exhaustivo para asegurar que se cumplan los objetivos establecidos en el GDD. El desarrollo se realiza de manera iterativa, permitiendo ajustes y mejoras continuas en función de las pruebas y los comentarios recibidos.
- Fase 4 - Postproducción: En esta fase, se realizan pruebas exhaustivas del sistema y se pone en funcionamiento la aplicación en diferentes versiones, como alfa, beta y proyecto terminado. Se realizan pruebas funcionales para verificar el correcto funcionamiento de todas las características y se llevan a cabo pruebas de rendimiento para garantizar un rendimiento óptimo en diferentes dispositivos. En el caso de las pruebas de metaverso, se verifica el funcionamiento del modo multiusuario desde diferentes ubicaciones y conexiones a Internet. Se recopilan los comentarios y sugerencias de los usuarios y se implementan las mejoras necesarias. Además, se realizan ajustes finales y se finaliza la documentación y los recursos necesarios para la distribución y lanzamiento del proyecto. Esta fase es crucial para garantizar que el sistema esté listo para ser utilizado por los usuarios finales y cumpla con los estándares de calidad establecidos.

Para la implementación del proyecto *Digital Factory Metaverse*, se ha utilizado esta metodología para organización y planeación adecuada de todo el sistema de realidad virtual como un conjunto. El desarrollo completo se puede detallar mediante el documento GDD que se muestra en el Apéndice D.

En la Figura 4.9, se muestra el proyecto *Digital Factory Metaverse* mediante la

utilización del *framework* de realidad virtual propuesto en esta investigación. La Figura a) muestra el desarrollo del Lobby para capacitación multiusuario, la Figura b) muestra una tecnología de robots de ensamble incluidos en el proyecto, la Figura c) muestra una zona de ensamble de partes para la fabricación de los automóviles y la Figura d) muestra una vista general de la zona de producción en un aspecto funcional utilizando realidad virtual.

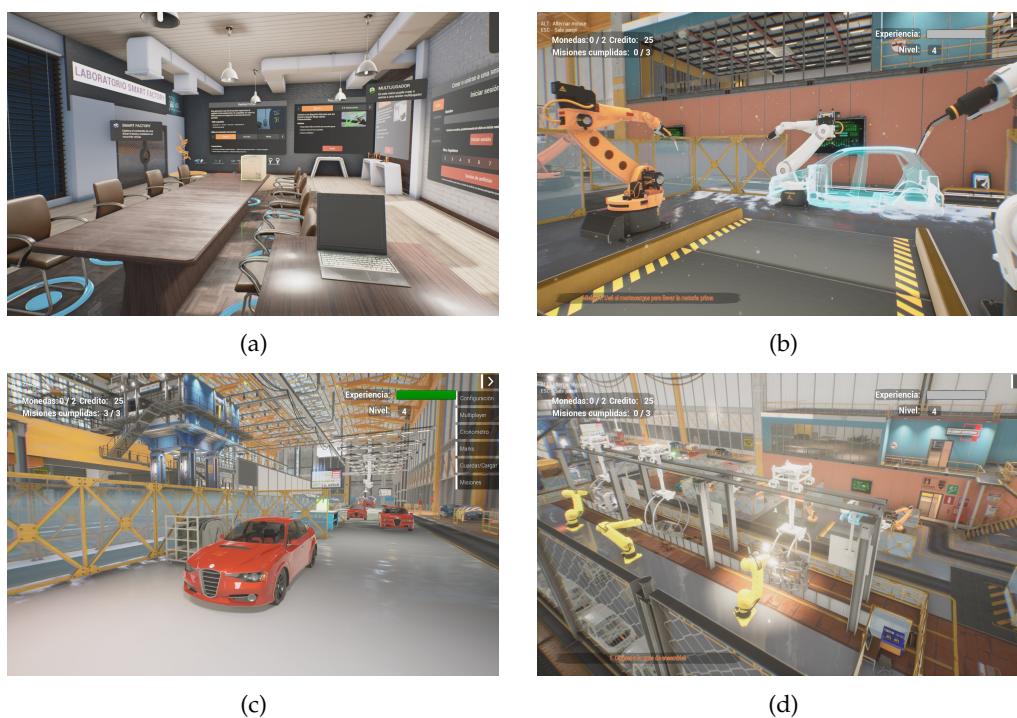


FIGURA 4.9: Aplicación del framework a caso de estudio. (a) lobby de bienvenida; (b) zona de robots de ensamble; (c) zona de ensamble de partes; (d) vista general de la planta.

4.4. Desarrollo de una plataforma para proyectos de metaverso

Para esta investigación se ha realizado la propuesta de desarrollo de una plataforma de metaverso y realidad virtual para funcionamiento en la web. La plataforma de metaverso propuesta se la ha denominado **Virprot** (<https://virprot.com/>) que se presenta como una solución innovadora que busca revolucionar la forma en que interactuamos con mundos virtuales. A diferencia de otras plataformas existentes, Virprot se centra en sistemas colaborativos para permitir una interacción directa con los usuarios y ofrecer un amplio contenido que alimenta el aplicativo principal de metaverso.

La plataforma Virprot actúa como un complemento para el desarrollo del sistema de *framework* de realidad virtual. Su propósito es proporcionar un entorno seguro y accesible en línea para alojar proyectos desarrollados mediante el *framework*. Al utilizar Virprot como plataforma base, los usuarios pueden compartir sus experiencias

de realidad virtual y metaverso, colaborar con otros usuarios, acceder a contenido adicional y explorar una amplia gama de posibilidades interactivas. Esto crea un ecosistema vibrante y en constante evolución, donde los usuarios pueden experimentar y disfrutar de diversas experiencias virtuales.

A continuación se describe las principales características de la plataforma.

4.4.1. Diseño y desarrollo de la plataforma Virprot

En cuanto al diseño, Virprot ha sido desarrollado utilizando un enfoque de diseño centrado en el usuario. Se han realizado investigaciones sobre las necesidades y preferencias de los usuarios en el ámbito del metaverso, lo que ha permitido crear una interfaz intuitiva y fácil de usar. La plataforma se ha diseñado pensando en la navegación sencilla y en la capacidad de personalización, para que los usuarios puedan adaptar su experiencia a sus necesidades y preferencias individuales.

En términos de desarrollo, Virprot se ha beneficiado de las últimas tecnologías y lenguajes de programación como HTML 5, enfocado desde la web 3.0. Se ha utilizado prácticas de desarrollo iterativas para asegurar la eficiencia y calidad del proceso de desarrollo. Además, se han llevado a cabo pruebas rigurosas para identificar y corregir posibles errores o fallos en la plataforma, garantizando así su estabilidad y rendimiento óptimo.

Además del aspecto técnico, el diseño y desarrollo de Virprot también ha tenido en cuenta la seguridad y privacidad de los usuarios. Se han implementado medidas de seguridad robustas para proteger la información personal y los datos sensibles de los usuarios. Asimismo, se ha prestado atención a la privacidad en cuanto a la recopilación de datos, asegurando que se cumplan las regulaciones pertinentes y que los usuarios tengan control sobre su información. En la Figura 4.10 se muestra la pantalla de inicio de Virprot.

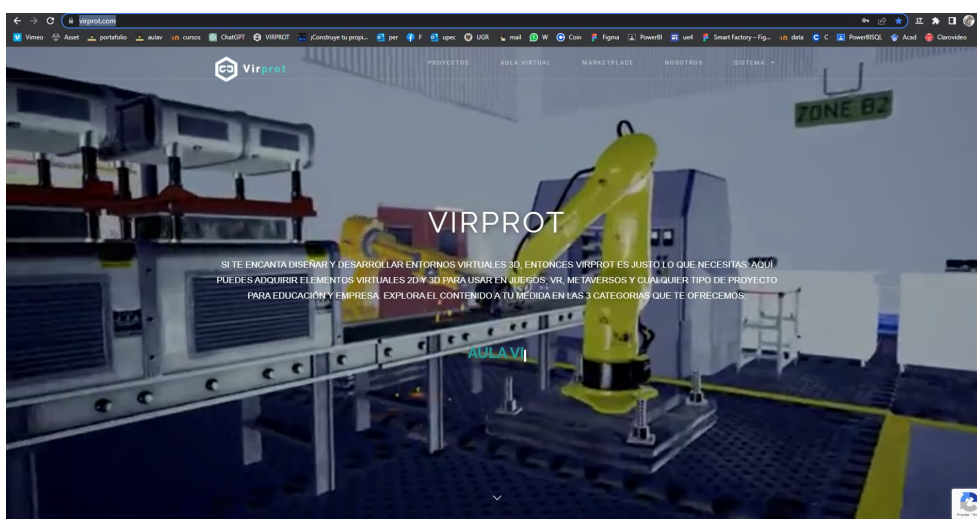


FIGURA 4.10: Pantalla de inicio de la plataforma de metaverso Virprot.

4.4.2. Estructura de Virprot

Virprot está diseñada para ofrecer a los usuarios una experiencia completa en el mundo del metaverso. La plataforma se divide en tres categorías principales: Proyectos, Aula Virtual y Marketplace. Esta estructura permite a los usuarios explorar diferentes aspectos del metaverso y aprovechar al máximo todas las posibilidades que ofrece.

- **Proyectos:** En esta categoría, los usuarios pueden acceder a una amplia variedad de proyectos de metaverso. Aquí podrán visualizar recorridos virtuales, experiencias en 360 grados y disfrutar de videotutoriales que los guiarán en el proceso de realización de las prácticas y uso de los aplicativos. Además, tendrán acceso a descargas, guías y documentación que facilitarán el aprendizaje y mediante laboratorios virtuales con realidad virtual y metaverso. En la Figura 4.11 se muestra el diseño de la categoría.

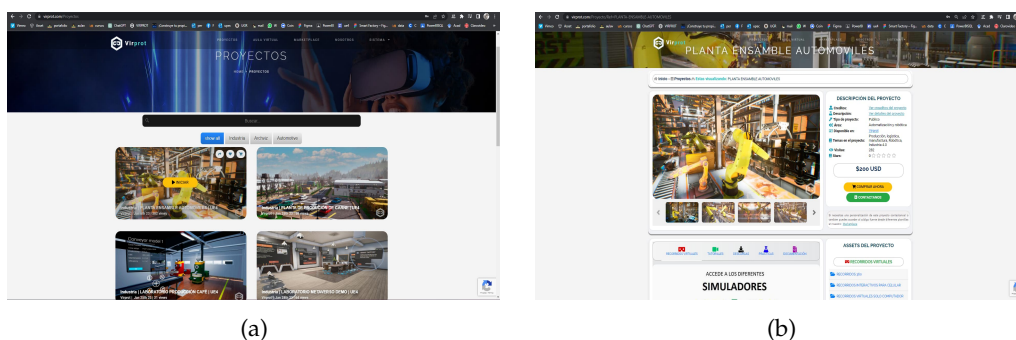


FIGURA 4.11: Categoría proyectos. (a) Muestra la pantalla de proyectos en la plataforma; (b) Muestra el contenido de los proyectos para los usuarios.

- **Aula Virtual:** Esta categoría se ha diseñado y desarrollado especialmente para brindar cursos de formación en realidad virtual y metaverso. Los usuarios podrán acceder a una variedad de cursos impartidos en la materia, que les permitirán adquirir conocimientos y habilidades necesarias para explorar y aprovechar al máximo el desarrollo de metaverso. Los cursos se ofrecerán de manera interactiva, fomentando la participación y el aprendizaje colaborativo entre los usuarios. La Figura 4.12 ilustra el diseño de la categoría en la plataforma Virprot.

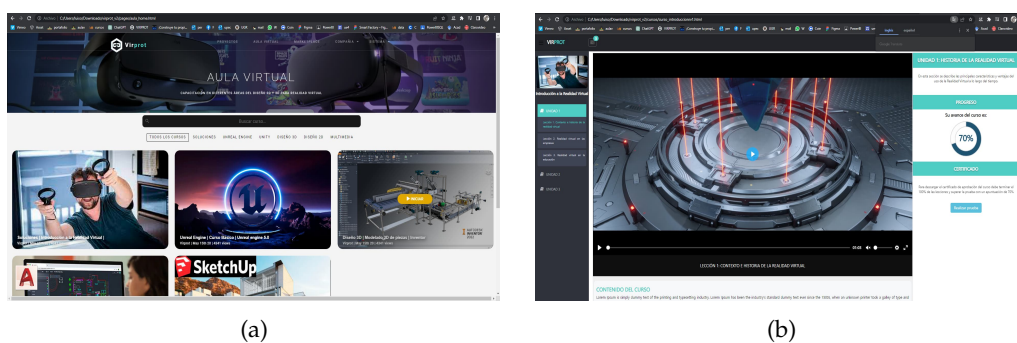


FIGURA 4.12: Categoría aula virtual. (a) Muestra la pantalla de aula virtual en la plataforma; (b) Muestra el contenido del aula virtual.

- **Marketplace:** Es un espacio dedicado a la adquisición de productos relacionados con el metaverso y la realidad virtual. Aquí, los usuarios podrán encontrar una amplia gama de recursos que les permitirán trabajar en proyectos personalizados. Desde assets, modelos 3D y hasta proyectos completos, el Marketplace de Virprot ofrece todo lo necesario para impulsar la creatividad y la innovación en el mundo del metaverso, ver Figura 4.13.

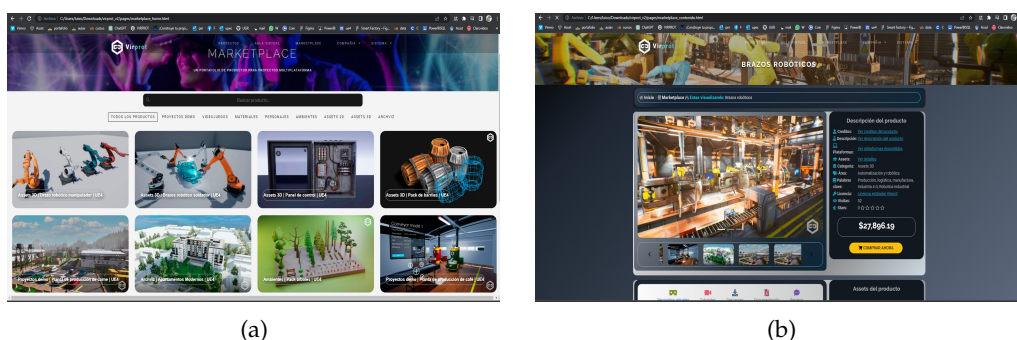


FIGURA 4.13: Categoría marketplace. (a) Muestra la pantalla del marketplace en la plataforma; (b) Muestra el Contenido del marketplace.

4.4.3. Diferenciación de Virprot

La plataforma Virprot destaca entre otras plataformas de metaverso por su enfoque en sistemas colaborativos y la interacción directa con los usuarios. A través de su contenido diverso y completo, Virprot ofrece a los usuarios la posibilidad de experimentar, aprender y crear en el mundo virtual de manera más accesible y dinámica. Esta diferencia clave coloca a Virprot como una opción novedosa y atractiva para aquellos interesados en sumergirse en el metaverso.

De esta manera, en los siguientes apartados se muestra un análisis comparativo de metaversos realizados y como la propuesta de plataforma realizada en esta investigación se puede aprovechar como una herramienta tecnología enfocada en la realidad

virtual y metaverso.

4.4.3.1. Análisis de creación de metaversos en diferentes plataformas

Para validar la contribución científica de esta investigación, se ha realizado una revisión bibliográfica exploratoria en bases de datos como Scopus, Web of Science y Google Scholar de los últimos 5 años sobre el tema de la creación de metaversos a nivel de plataformas y frameworks para su aplicación en diferentes áreas. Los resultados obtenidos de las palabras clave "virtual reality", "metaverse", "frameworks", "platforms", arrojaron alrededor de 45 resultados, de los cuales se seleccionaron solamente los artículos que enfoquen la investigación en la creación de un metaverso y su aplicación en un caso de estudio. Además, se validó según la investigación realizada por [83], donde se realiza un estudio de metaversos y se clasifica en plataformas de metaverso para educación.

Además de la revisión bibliográfica realizada de los principales metaversos, también se analizaron las plataformas de metaversos creadas por empresas en relación con la investigación realizada.

A continuación, se presenta en la Tabla 4.2 un resumen y análisis de los principales metaversos propuestos por investigadores y empresas mediante plataformas, para ello se ha clasificado en: Plataformas de metaverso a gran escala, plataformas de metaverso a pequeña escala y propuesta de desarrollo de aplicativos de metaversos en investigación.

Plataformas de metaverso a gran escala	
Spatial [84]	Es una innovadora plataforma que permite llevar a cabo reuniones en realidad virtual, ofreciendo a los usuarios la posibilidad de interactuar y comunicarse con otros participantes de forma inmersiva. Esta plataforma, anteriormente solo accesible a través de costosos dispositivos de realidad virtual, ahora estará disponible sin la necesidad de adquirir un casco de estas características.
AltSpace VR [85]	Es una plataforma de realidad virtual social que permite a los usuarios interactuar en espacios virtuales en tiempo real. Los usuarios pueden crear y personalizar sus propios avatares para participar en una amplia variedad de actividades virtuales, desde asistir a eventos en vivo, hasta socializar con amigos en salas privadas.
Horizon Workrooms [86]	Es una plataforma de realidad virtual (VR) desarrollada por Facebook que permite a los usuarios tener reuniones virtuales en un espacio tridimensional. La plataforma utiliza tecnología de VR para crear una experiencia de reunión en la que los usuarios pueden verse a sí mismos y a los demás como avatares en un ambiente de oficina virtual.
Engage VR [87]	Es una plataforma de realidad virtual (VR) que permite a los usuarios crear, participar y colaborar en experiencias de aprendizaje y reuniones virtuales. Con Engage VR, los usuarios pueden interactuar con otros usuarios de todo el mundo en un entorno de VR inmersivo, lo que facilita la colaboración y el aprendizaje.

Plataformas de metaverso a pequeña escala

Simlab VR Collaboration [88]	Es una herramienta complementaria al ya exitoso Simlab Visor de realidad virtual, que permite a múltiples usuarios participar en experiencias de realidad virtual compartidas. Con este complemento, los usuarios pueden invitar a otros participantes a sumergirse en un mismo ambiente virtual y colaborar en tiempo real.
Innoarea [89]	Busca acercar la innovación a empresas a través de soluciones XR para mejorar la productividad y conexión entre equipos de trabajo en el sector industrial. Permiten conectar a personas sin importar la distancia, mediante tecnologías intuitivas y colaborativas.
Virtualware [90]	Incluye el diseño y desarrollo de aplicaciones de realidad virtual y aumentada, la consultoría de tecnologías inmersivas, la integración de sistemas y la formación. Virtualware ha creado soluciones innovadoras que han sido utilizadas por empresas de todo el mundo para mejorar sus procesos de trabajo y brindar experiencias de usuario únicas.
Virprot [91]	Es una plataforma de realidad virtual y metaverso en pequeña escala que permite a los usuarios crear y experimentar mundos virtuales inmersivos. A diferencia de otras plataformas de realidad virtual y metaverso a gran escala, Virprot se enfoca en soluciones personalizadas para empresas e instituciones de educación superior que desean crear experiencias virtuales para capacitación, simulación, colaboración y otros fines.

Propuesta de desarrollo de aplicativos de metaversos en investigación

[92]	Con el artículo - <i>Smart Factory Using Virtual Reality and Online Multi-User: Towards a Metaverse for Experimental Frameworks</i> . Se propone el desarrollo de un aplicativo de realidad virtual y metaverso creado mediante el motor gráfico Unreal Engine.
[93]	Con el artículo - <i>Design and implementation of a metaverse platform for traditional culture: the chime bells of Marquis Yi of Zeng</i> . Se propone el desarrollo de un aplicativo de realidad virtual y metaverso creado mediante el motor gráfico Unity.
[94]	Con el artículo - <i>Data Collection Framework for Context-Aware Virtual Reality Application Development in Unity: Case of Avatar Embodiment</i> . Se propone el desarrollo de un aplicativo de realidad virtual y metaverso creado mediante el motor gráfico Unity.
[53]	Con el artículo - <i>Constructing an Edu-Metaverse Ecosystem: A New and Innovative Framework</i> . Se propone el desarrollo de un aplicativo de realidad virtual y metaverso creado mediante el motor gráfico Unity.

TABLA 4.2: Aportes de metaversos a la comunidad científica en los últimos 5 años.

4.4.3.2. Características del metaverso

El concepto de metaverso ha ganado relevancia en los últimos años, definiendo un espacio digital inmersivo donde los usuarios pueden interactuar, crear, explorar y participar en diversas actividades. Sin embargo, para que un metaverso pueda funcionar de manera efectiva, debe cumplir con ciertas características clave, como se muestran a continuación, estas características están basadas y adaptadas de [95], [53]:

Características	Descripción
<i>Plataforma online web</i>	Es esencial contar con una plataforma online web para acceder al metaverso desde cualquier lugar del mundo. Esta plataforma debe ser fácil de usar y tener una interfaz intuitiva para que los usuarios puedan navegar y explorar el metaverso de manera efectiva.
<i>Precio</i>	El precio del metaverso es importante, ya que puede determinar la cantidad de usuarios que estarán dispuestos a ingresar al mismo. Si el metaverso es gratuito, esto puede aumentar el número de usuarios, pero si es de pago, esto puede garantizar la calidad y el mantenimiento constante del metaverso.
<i>Contenido y material para los usuarios</i>	Ofrece diferente tipo de contenido como simuladores webs, videotutoriales, guías de trabajo y documentación para que los usuarios puedan realizar prácticas guiadas para todo el recorrido del metaverso.
<i>Interoperabilidad</i>	El metaverso debe ser capaz de interoperar con otras tecnologías y sistemas, lo que significa que debe ser compatible con diferentes dispositivos.
<i>Inmersión</i>	El metaverso debe ser capaz de crear una experiencia inmersiva para los usuarios, lo que significa que deben sentir que están realmente presentes en el mundo virtual y ser capaces de interactuar con él de manera natural y fluida.
<i>Escalabilidad</i>	El metaverso debe ser capaz de manejar un gran número de usuarios simultáneamente, sin afectar la calidad de la experiencia de los usuarios.
<i>Personalización</i>	Los usuarios deben ser capaces de personalizar su avatar, el entorno y su experiencia general en el metaverso.
<i>Economía virtual</i>	Debe haber una economía virtual en el metaverso que permita a los usuarios comprar, vender y comerciar con bienes y servicios virtuales.
<i>Seguridad y privacidad</i>	El metaverso debe ser seguro y proteger la privacidad y los derechos de los usuarios, al mismo tiempo que proporciona herramientas para denunciar y solucionar cualquier problema de seguridad o acoso.
<i>Aprendizaje y creatividad</i>	El metaverso debe ser una plataforma de aprendizaje, lo que significa que debe proporcionar a los usuarios oportunidades para aprender y desarrollar nuevas habilidades. Además, debe fomentar la creatividad y la innovación, lo que significa que debe proporcionar herramientas para que los usuarios creen y compartan su propio contenido.
<i>Gráficos</i>	Los gráficos y la calidad visual son una parte importante de la experiencia del metaverso. Para un metaverso de alta calidad, se necesitan gráficos de alta definición y renderización en tiempo real, para lograr una experiencia inmersiva y realista.

<i>Interconectividad y accesibilidad</i>	El metaverso puede ser accesible desde Internet o localmente, dependiendo de la plataforma y las preferencias del usuario. Debe ser capaz de conectar a los usuarios en tiempo real, independientemente de su ubicación física o dispositivo utilizado para acceder al metaverso.
<i>Hardware requerido</i>	El metaverso puede requerir hardware especializado para proporcionar una experiencia de usuario óptima. Por ejemplo, se puede requerir una tarjeta gráfica de alta gama y un procesador potente para manejar los gráficos y la renderización en tiempo real.
<i>Facilidad de uso</i>	Se refiere a varios aspectos, como la interfaz de usuario, la navegación, la personalización y la accesibilidad. Algunos metaversos son más intuitivos y fáciles de usar que otros, y esto puede depender de la experiencia previa del usuario en entornos virtuales o juegos similares.
<i>Almacenamiento</i>	El metaverso puede requerir grandes cantidades de almacenamiento para almacenar los datos de usuario y la información del entorno virtual.

TABLA 4.3: Características del metaverso.

De acuerdo con la tabla anterior, se puede analizar que el sistema de *framework* de realidad virtual y metaverso propuesto en esta investigación cumple a satisfacción con la mayoría de las características como se detallan a continuación.

- **Plataforma online web:** Se creó la plataforma de metaverso y realidad virtual VIRPROT.
- **Precio:** Se ha definido precios gratuitos y pagos para poder ingresar al metaverso.
- **Contenido y material para los usuarios:** Se ofrece en la plataforma de simuladores web, videotutoriales, guías de trabajo y documentación para que los usuarios puedan realizar prácticas guiadas para todo el recorrido del metaverso.
- **Interoperabilidad:** El aplicativo de metaverso es compatible con diferentes dispositivos de gafas de realidad virtual y sistema WIN 64.
- **Inmersión:** El aplicativo de metaverso funciona con realidad virtual, lo cual permite una inmersión al usuario.
- **Escalabilidad:** El aplicativo de metaverso puede alojar por sesión creada hasta 30 participantes al mismo tiempo.
- **Personalización:** Los usuarios están en la capacidad de poder personalizar ciertas características del avatar y poder hacer configuraciones de los espacios para creación de escenarios de prácticas.
- **Economía virtual:** El aplicativo de metaverso no cuenta con una economía virtual dentro del metaverso; sin embargo, los usuarios sí pueden crear inventarios de objetos tipo compra.
- **Seguridad y privacidad:** El aplicativo de metaverso cuenta con una seguridad de inicio de sesión que permite registrar al usuario y permitir un ingreso único en el sistema.
- **Aprendizaje y creatividad:** El aplicativo de metaverso está creado con módulos enfocados a la enseñanza, aprendizaje, los usuarios pueden crear y compartir el contenido que creen.

- **Gráficos:** El aplicativo de metaverso está creado en el motor gráfico Unreal Engine, lo que ha permitido que todos sus assets sean de alta calidad gráfica, todas las escenas creadas están trabajadas de forma hiperrealista para una mayor inmersión de los usuarios en el entorno.
- **Interconectividad y accesibilidad:** Por costos el aplicativo de metaverso solamente puede funcionar de forma local y no de forma directa en internet como otros metaversos, los usuarios deberán descargar de la plataforma VIRPROT el aplicativo y ejecutarlo en un ordenador de gama media, la accesibilidad del aplicativo es capaz de conectar a los usuarios en tiempo real, independientemente de su ubicación física.
- **Hardware requerido:** El aplicativo de metaverso requiere de requisitos mínimos para trabajar: un ordenador de gama media con una tarjeta gráfica Nvidia 3060, RAM 16 G, procesador i7.
- **Facilidad de uso:** El aplicativo de metaverso cuenta con una interfaz gráfica amigable con el usuario con el fin de que se pueda utilizar lo más fácil posible.
- **Almacenamiento:** Mediante la plataforma VIRPROT se almacena datos de usuarios, dentro del aplicativo de metaverso los datos se guardan de forma local en el ordenador del usuario.

4.5. Conclusiones

La realidad virtual y el metaverso ofrecen oportunidades prometedoras para mejorar la colaboración y la comunicación en entornos virtuales. Este trabajo se centra en el desarrollo de un *framework* experimental que busca formalizar y mejorar estas prácticas en el sector educativo y productivo. La creación de este *framework* representa un avance significativo en la búsqueda de interacciones más inmersivas y colaborativas en entornos virtuales.

El desarrollo del *framework* se ha llevado a cabo utilizando el motor gráfico Unreal Engine. El *framework* cuenta con diferentes componentes funcionales, configuraciones orientadas a objetos e interfaces fáciles de usar. Además, se ha propuesto el desarrollo de una plataforma de realidad virtual y metaverso que funciona como complemento a los proyectos realizados con el *framework*. Esta plataforma ofrecerá una experiencia de realidad virtual y metaverso más completa y permitirá la conexión de usuarios desde diferentes partes del mundo, ampliando las posibilidades de interacción y colaboración.

Con el desarrollo de este *framework*, se pretende superar las limitaciones actuales y explorar nuevas posibilidades en términos de interacción humana, comunicación y colaboración en entornos virtuales. Se espera que este enfoque pueda optimizar los programas de capacitación y formación en empresas e instituciones educativas, aprovechando las ventajas de la realidad virtual para ofrecer experiencias más inmersivas y efectivas. El *framework* representa un paso importante hacia la mejora de las prácticas de colaboración y comunicación en mundos virtuales 3D con realidad virtual y metaverso.

Integración de una función basada en diseño modular para Smart Factory

5.1. Motivación

El diseño y distribución de la planta es crucial para el éxito de cualquier operación de fabricación o producción, ya que tiene un gran impacto en la eficiencia y la productividad. Un enfoque de diseño modular puede ser una forma efectiva de optimizar la distribución de la planta, ya que permite la creación de una infraestructura de instalaciones y máquinas flexibles que puede adaptarse a los cambios en la producción y los requisitos del mercado.

Con relación a esto, es importante destacar que la planificación, diseño y construcción de una planta está condicionada por la experiencia de los profesionales en el área, lo cual limita la participación de otros profesionales que deseen intervenir en el diseño y distribución de espacios mediante configuraciones adaptadas a la fabricación personalizada. Por lo tanto, las herramientas de diseño tienen un gran potencial en su uso, ya que permiten crear escenarios donde se pueden diseñar aspectos que en la práctica real podrían resultar costosos en tiempo y dinero.

Al crear un entorno virtual 3D colaborativo, se busca que la experiencia de enseñanza-aprendizaje sea enriquecida con características como la reutilización, modificación y adaptabilidad de elementos. Sin embargo, muchos sistemas de este tipo no permiten cambios en sus componentes sin afectar su funcionamiento, lo que dificulta la creación de escenarios o configuraciones personalizadas.

Por tanto, en este capítulo, se realiza una primera aproximación al diseño modular bajo un contexto de plantas de producción en *Smart Factory*, mediante la propuesta progresiva del desarrollo de una función de diseño modular para el sistema de *framework* principal de realidad virtual propuesto en el capítulo anterior. Esta función permitirá generar espacios y elementos 3D propios de sistemas basados en los conceptos modulares que podrán ser replicables y adaptables a las necesidades y problemáticas específicas de los sistemas de producción en las empresas, ofreciendo las funcionalidades requeridas

en cada caso y ajustándose al criterio y ritmo de implementación que necesiten.

5.2. Propuesta de Integración de una función basada en diseño modular para Smart Factory en el framework principal de realidad virtual y metaverso

En este capítulo se presenta la propuesta de desarrollo de una función basada en el diseño modular para trabajar con objetos bajo flexibilidad y configuración en tiempo real para distribución de espacios con realidad virtual. Este desarrollo complementará al *framework* de realidad virtual propuesto en el Capítulo 4, el cual presenta una primera aproximación de un *framework* de sistema de realidad virtual basado en el metaverso. Sin embargo, este *framework* tiene limitaciones, por lo que en esta investigación en una versión 3.0 se agregaran nuevas funciones basadas en diseño modular para mejorarlo.

Para lograr este objetivo, como se muestra en la Figura 5.1, se llevó a cabo una investigación y desarrollo exhaustivo de la propuesta del *framework*, basada en los componentes para diseño modular, interfaces de usuario y datos y multiusuario.

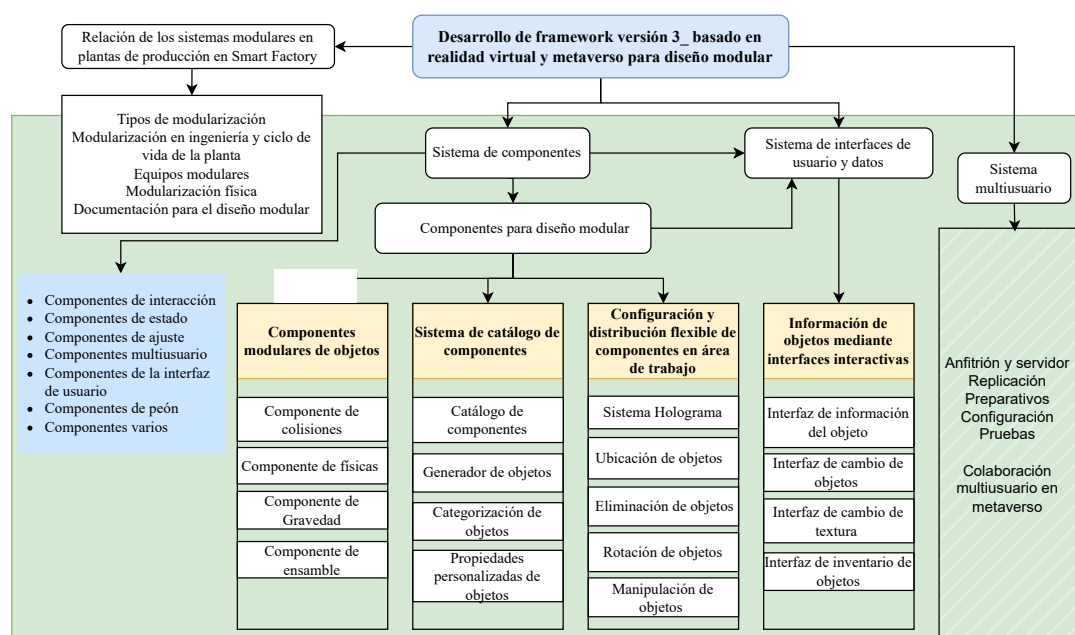


FIGURA 5.1: Framework para diseño modular.

A continuación se describe los aspectos más importantes del diseño modular basado en *Smart Factory*, así como las funciones y componentes de diseño modular integrados en el *framework* propuesto:

5.2.1. Relación de los sistemas modulares en plantas de producción en Smart Factory

La implementación técnica de plantas de producción modulares es más compleja y desafiante que las plantas de producción convencionales [96]. Por tanto, además de la optimización sustancial del proceso, la naturaleza de la ingeniería y construcción de la planta también debe adaptarse para aprovechar al máximo los beneficios de un enfoque de producción flexible y modular para productos personalizados y especializados.

Gracias a los avances en la tecnología de simulación por computadora, hoy en día, no solo se pueden desarrollar las características geométricas de un objeto en tres dimensiones, sino también sus características funcionales que permiten predecir y configurar cambios respecto a situaciones reales [24].

Si bien las tecnologías han tenido una buena incursión y gran aceptación en diversas etapas del diseño industrial para productos y aplicaciones industriales, las facultades de diseño personalizado con ajuste automático a las necesidades del cliente (personalización) y de interacción con usuario para acciones de realimentación y toma de decisiones (controlabilidad) no han sido tenidas en cuenta.

5.2.1.1. Innovación y desarrollo tecnológico para sistemas modulares

El problema para el planeador y diseñador de plantas de producción es la falta de reglas y pautas de diseño claras para decidir desde una fase inicial de un proyecto de diseño de planta si se debe seguir un concepto tradicional de diseño, o si fuera más inteligente, utilizar una estrategia nueva para la implementación de procesos completamente modularizados bajo nuevas tendencias a los nuevos mercados en enfoque de *Smart Factory*.

También, dentro del desarrollo y construcción de plantas modulares en las que actualmente existen algunos impulsores [60], todavía existen desafíos en los que se requieren mejorar los métodos y las estrategias de planificación y diseño existentes a plantas de producción, especialmente para la *Smart Factory*. En la Tabla 5.1 se muestra un análisis FODA (fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas) de la situación actual de la modularización como implementación en casi todos los pasos en la planificación y el diseño de una instalación industrial.

<p>Fortalezas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Adaptación y reutilización inteligente de módulos que abordan ciclos de producto cortos. • Flexibilidad, eficiencia y rentabilidad mejoradas mediante plantas de producción multipropósito reconfigurables. • Documentación para futuras aplicaciones. • Pruebas y capacitación de operadores mediante la utilización de tecnologías emergentes como la Realidad Virtual. • Es posible una realización más fácil de contención cerrada (por ejemplo, para impactos ambientales bajos) debido a la pequeña escala 	<p>Debilidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Esfuerzo adicional para la primera implementación y mantenimiento de un enfoque de ingeniería modular (por ejemplo, bases de datos, soporte de software) • Poco esfuerzo adicional para el diseño y construcción del prototipo de módulo a través de pautas esenciales mediante la simulación por computadora. • Restricción de oportunidades técnicas debido a pautas de diseño y conflicto de objetivos (por ejemplo, optimización / estandarización de procesos). • Las soluciones estándar disponibles pueden inhibir la aplicación de soluciones innovadoras. • <u>Aplicabilidad limitada a plantas de producción a escala mundial.</u>
<p>Oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tecnologías emergentes que permiten diseñar y desarrollar una amplia gama de aplicaciones. • Suministro rápido de una planta de producción activada por demanda personalizada. • Plantas de producción descentralizadas y con uso eficiente de los recursos productivos. • Reducción de riesgos de inversión. • Nuevos enfoques de ingeniería y construcción, p. Ej. ingeniería ajustada y un mercado de proveedores más amplio. • Nuevas oportunidades comerciales, p. Ej. planificación, mantenimiento, servicio, arrendamiento de módulos para proveedores o empresas de ingeniería. 	<p>Amenazas</p> <ul style="list-style-type: none"> • La tasa de reutilización sigue siendo baja (soluciones especiales). • Reconfigurabilidad alcanzable insuficiente. • Riesgo de pérdida de conocimientos. • Diferentes normativas locales frente a normalización en los procesos. • Baja aceptación de conceptos innovadores de plantas de producción bajo nuevos enfoques como la Smart Factory.

TABLA 5.1: Análisis FODA de situación actual de los sistemas modulares.

5.2.1.2. Tipos de modularización

En las instalaciones de un solo uso (instalaciones que se diseñan para un solo propósito), las instalaciones y el equipo se instalan y fijan para que no puedan ser intervenidas frecuentemente por los operarios. Según expertos en diseño modular, para lograr un diseño modular exitoso es fundamental la estandarización de las interfaces. Esto incluye tanto las interfaces entre los componentes como las interfaces entre los componentes y los usuarios en el caso de las instalaciones modulares [59]. De este modo, el diseño modular permite la mejora de los módulos de manera individual sin tener que modificar parte (o todo) el resto del diseño. Incluso si hay varias alternativas para un mismo problema (módulo) la generación de todas las alternativas produce productos diversos.

Algunas cuestiones importantes para tener en mente en el concepto modular al momento de diseñar y montar una instalación son:

- ¿Cómo garantizar que el equipo correcto esté en la sala de producción correcta, en el momento indicado?
- ¿Se está llevando a cabo el seguimiento de los productos que se desplazan por las instalaciones con la eficiencia necesaria?
- ¿Cómo configurar o reconfigurar un sistema de producción que involucre equipos e instalaciones para múltiples procesos?
- ¿Cómo funciona un diseño modular bajo parámetros de producción personalizada?

El diseño modular permite crear variedad o, al menos, generar una apariencia de variedad, sin incurrir en los costes de la producción a medida. Mediante esta técnica

se crean módulos o sub-montajes que son intercambiables y que permiten obtener diferentes combinaciones para configuraciones de planta adecuada a las necesidades de producción.

En la Tabla 5.2 se ha realizado una clasificación de los tipos de módulos que se pueden utilizar en el concepto de configuración modular y que se pueden adaptar a sistemas de producción.

CLASIFICACIÓN DE MÓDULOS	ACTIVO	PASIVO	ACCIÓN
PLEGABLE	Aparece haciendo posible su funcionalidad (despliega)	Desactiva su presencia reduciendo su volumen.	Abre/cierra
DESMONTABLE	Se junta con otras piezas conformando una, sin necesidades de uniones.	Se desactiva desmontando las piezas, desarmando la unidad.	Aparece/desaparece
APILABLE	Se hace presente apilando o desapilando verticalmente	Las piezas se apilan encajando unas con otras, reduciendo su volumen.	Aparece/desaparece
ADOSABLE	Se hace presente juntando una o más piezas, pieza individual funcional a una mayor	Las piezas se ordenan volviendo a la posición inicial. Puede funcionar individualmente cada pieza.	Aparece/desaparece
DESARMABLE	Se junta con otras piezas conformando una, requiriendo de piezas para las uniones.	Se separan las piezas ganando espacio	Abre/Cierra Aparece/desaparece
INFLABLE	Se activa su presencia por medio de una cámara de aire.	Desaparece reduciendo su volumen considerablemente.	Aparece/desaparece
ENROLLABLE	Se hace presente abriéndose horizontal o verticalmente	Deja de ocupar el lugar enrollándose en sí mismo	Abre/Cierra

TABLA 5.2: Clasificación de módulos.

5.2.1.3. Modularización en ingeniería y ciclo de vida de la planta

La modularización en el ciclo de vida de una planta (ver Figura 5.2) la podemos estructurar en diferentes fases de proyecto (planeación, construcción, operación, desmantelamiento y reutilización). Los proyectos bajo conceptos de modularización adecuada pueden lograr una fase de ingeniería acelerada de construcción de cada parte de la planta, así como de los equipos, también puede reducir los tiempos de producción y comercialización mediante la reutilización de información de ingeniería y el manejo de datos a lo largo de todas las fases del proyecto antes de poderse llevar a una modularización física.

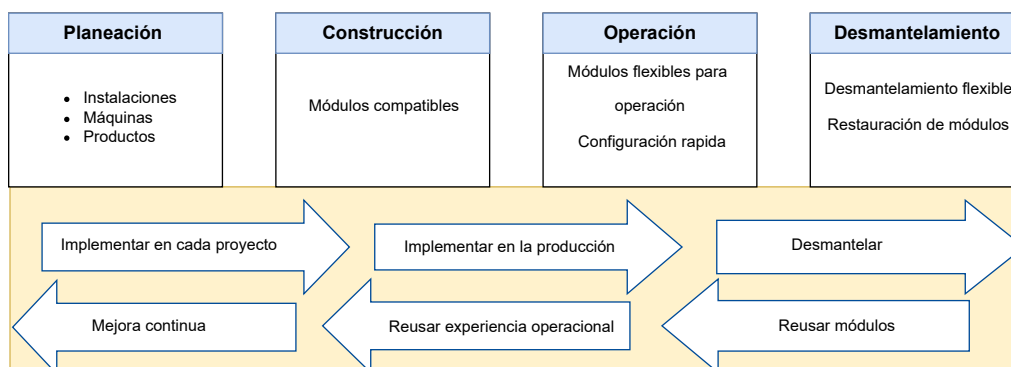


FIGURA 5.2: Niveles de modularización para proyectos de diseño de plantas de producción.

Para abordar la configuración modular en sistemas de producción se ofrece una modularización física de las plantas de proceso que puede tener lugar en cuanto a equipos y logística en el sitio. Si se desea una modularización física, los módulos que se construyan deben ser compatibles y adaptables que permitan el ensamble para formar plantas multipropósito. Esto puede simplificar el mantenimiento, el servicio, reducción de tiempos de cambio y la posibilidad de intercambiar módulos acordes al proceso productivo. Una vez finalizada la fase de producción, la planta industrial puede ser desmantelada, mientras que tanto la información como los componentes físicos que la conforman pueden ser reutilizados. Este proceso garantiza la mejora continua de la empresa, así como la aplicación de la experiencia operativa adquirida para una rápida adaptación a nuevas configuraciones de producción.

Equipos modulares

En una planta de producción, la disponibilidad de equipo de procesamiento es un requisito fundamental para poder funcionar. Los equipos modulares (ME) dentro de la instalación industrial pueden llegar a tener comportamientos de configuración a la medida para estandarizar procesos que requieran adaptación, manejo y operación rápida para producción personalizada. En los equipos modulares, una sola pieza de todo el conjunto que forma la máquina puede definirse como modular si cumple con una de las siguientes características:

- Proporciona numeración en serie o en paralelo de elementos básicos de ubicación, ensamble y montaje, así como características claves que indiquen la reutilización y fácil adaptación con otros equipos.
- Proporciona diferentes tipos de módulos configurables para adaptarse fácilmente a diversas condiciones de operación.
- Proporciona la misma funcionalidad que otros equipos similares a diferentes escalas operativas de funcionamiento que pueden adaptarse fácilmente entre máquina y máquina.

Modularización física

Para lograr instalaciones con producción continua, ágiles y configurables, con producción descentralizada, se puede lograr mediante la aplicación de la modularización física. La modularización física es apropiada para plantas de producción multiproducto/multipropósito, en las que se requiere reconfiguraciones muy frecuentes del proceso productivo según el producto a fabricar. Además, la integración de equipos a la que se le puede denominar “conjuntos de equipos de proceso individuales” (CEPI) permite conceptos de producción híbridos configurables bajo diferentes tipos de módulos altamente eficientes. Además, estos equipos contienen condiciones geométricas modulares y de seguridad que permite la integración de diferentes configuraciones de equipos sin mayores revisiones de diseño en un tiempo corto y sin costos asociados.

Los CEPI se pueden intercambiar en cualquier condición operativa de la planta, a través de mecanismos e interfaces físicas definidas para permitir una adaptación versátil en plantas de producción modulares multiproducto/multipropósito. Cada CEPI se debe construir en un sistema móvil transportable que brinde flexibilidad en la configuración de instalación en la planta física mediante disposición modular de rotación y traslación de sus partes para que puedan adaptarse fácilmente a las conexiones fluidicas y eléctricas mediante compartimentos predefinidos. Para escenarios de producción autónomos o descentralizados, la integración de los CEPI se puede realizar en contenedores de carga modificados (containers o furgonetas) lo que puede proporcionar una infraestructura completamente integrada para construir un entorno de producción móvil y reconfigurable, que solo requiere suministro de servicios básicos en el sitio.

El concepto modular para una instalación física debe contemplar una infraestructura modular adecuada para acceso a los servicios públicos en los que se requiera conexiones rápidas entre máquina e instalación y operario, p. ej. materias primas, corrientes de desechos, agua, luz, ventilación, conexiones de datos necesarias. También debe comprender el concepto logístico (por ejemplo, almacén), así como aspectos de servicio (por ejemplo, mantenimiento).

5.2.1.4. Documentación para el diseño modular de plantas industriales a pequeña escala

En el ciclo de vida de una planta de producción se puede considerar aplicar un enfoque de modularización sistemática que cubra todo el desarrollo del proceso, desde la planeación hasta el desmantelamiento. Para garantizar una adecuada planeación del diseño modular de plantas modulares a pequeña escala, se ha propuesto para esta investigación definir unos documentos necesarios para la construcción de módulos en unidades de proceso funcionales, a los que se les ha denominado "Documento de Diseño Modular" (DDM) para plantas industriales a pequeña escala.

Un DDM debe incorporar al menos dentro de su conjunto un elemento de equipo principal, que proporcione la operación modular y configuración deseada, junto con todos los componentes y periféricos necesarios para su funcionamiento (por ejemplo, tuberías, motores, sistema eléctrico y electrónico). Dentro de cada DDM, los elementos principales del equipo se pueden intercambiar y combinar para adaptar el diseño modular a diferentes condiciones de funcionamiento en el proceso productivo.

Cada DDM debe contener información propia del ciclo de vida de planta según su actividad, esta información se almacena mediante base de datos. La base de datos del DDM debe abarcar todo el período de ciclo de vida de la planta, es decir, desde el diseño conceptual a través de la especificación del equipo en ingeniería básica y de detalle hasta la adquisición y construcción, así como la operación y mantenimiento de la planta. El DDM comprende todos los documentos necesarios para una construcción y operación exitosas, algunos de ellos, por ejemplo:

- Pauta de diseño técnico, P&ID,
- Hojas de datos de instrumentos,
- Estimación de costos,
- Flujogramas analíticos,
- Modelos de la información de ingeniería CAD 3D mediante layout.
- Simuladores Virtuales que representan virtualmente el proceso deseado (gemelo digital).

Estos documentos deben incluir plantillas mediante una lista de posibles alternativas de configuración (Propuestas de múltiples posibles escenarios en configuración modular de la planta). Si ningún DDM que se haya diseñado previamente cumple con la especificación de la tarea del proceso en consideración, se debe diseñar un DDM nuevo. Por lo tanto, el paquete de documentación DDM más adecuado se utiliza como punto de partida, ya sea para una planta nueva o reconfiguración de una existente, con ello se puede realizar reconfiguraciones rápidas del proceso mediante el intercambio de DDM individuales. Una vez que se cambia un DDM, la ventana de operación del DDM se adapta automáticamente. Este enfoque respalda el concepto de plantas de producción reconfigurables.

Para garantizar la compatibilidad con DDM y una reconfiguración rápida y sencilla de la planta, se debe cumplir con los requisitos de una gran variedad de procesos potenciales. Esto solo se puede lograr con equipos flexibles adecuados para adaptarse a las condiciones de los límites locales. Aunque los equipos deben estandarizarse para las conexiones que se aplican con frecuencia, todavía se necesita cierto grado de libertad para adaptar a los requisitos locales. Esto permitirá una rápida instalación de los DDM y reconfiguración de la planta en plantas multipropósito.

En casos de intercambio en configuración muy frecuente, se requieren equipos modulares altamente estandarizados que permitan una conexión y desconexión rápida. Es importante tener en cuenta que la estandarización excesiva puede acarrear costos considerables, por lo que es esencial encontrar un equilibrio adecuado entre la estandarización y la flexibilidad. De esta manera, se podrán evitar costos adicionales significativos y garantizar una eficiencia óptima en el proceso.

En plantas de producción de un solo propósito no se requiere una reconfiguración frecuente. Para los dos casos es necesario garantizar que las tuberías y el cableado locales puedan conectar los módulos entre sí. Se requieren dimensiones y tecnologías de conexión definidas, así como ubicaciones de transferencia, tanto para equipos mecánicos como eléctricas o de información. Por lo tanto, la atención debe centrarse en los aspectos del concepto general que determinan el tiempo y el costo.

Los DDM deben diseñarse intrínsecamente seguros, enfocados en definir una estructura que aún permita una adaptación flexible de las interacciones que tienen los módulos entre sí. Al definir la estructura de los DDM, la ergonomía y mantenimiento, deberán tenerse en cuenta para los cambios en cada configuración, así como la limpieza

serán cruciales para evitar la contaminación cruzada, especialmente en plantas multi-propósito. Esto requerirá equipos modulares inteligentes para el suministro de agentes de limpieza, eliminación de desechos y ventilación que puedan adecuarse sin afectar ningún espacio de la planta modular.

5.2.2. Sistema de componentes

Para trabajar con sistemas modulares en un escenario de mundo virtual 3D con realidad virtual, se han mejorado las funciones iniciales del *framework* original con el fin de complementarlas y adaptarlas a las funciones de diseño modular. En este sentido, los componentes, como la interacción, el estado, los ajustes, el multiusuario, la interfaz de usuario, el peón y otros, han sido modificados, logrando un resultado intermedio que puede facilitar la interacción ágil y rápida entre los objetos, sus funciones, características y la configuración inmersiva de escenarios en tiempo real en proyectos de realidad virtual.

A continuación, se detalla los componentes especiales de diseño modular desarrollados en el *framework* para trabajar de una forma correcta con proyectos de realidad virtual.

5.2.2.1. Componentes para diseño modular

Los componentes modulares de objetos son elementos fundamentales en el contexto de la modificación de objetos mediante realidad virtual. Estos componentes permiten a los usuarios realizar cambios en la forma, textura y tamaño de los objetos dentro del entorno de trabajo virtual. Su objetivo principal es brindar a los usuarios opciones flexibles para tomar decisiones respecto al espacio disponible, ya que en muchas ocasiones las restricciones de espacio son un factor importante a considerar.

Dentro de los componentes modulares que se estudian y se desarrollan están los componentes de conexión, componentes de física, componentes de gravedad y componentes de ensamblaje. Para ello, en la Figura 5.3 se muestran los componentes mencionados.

A continuación, se describen brevemente los diferentes componentes modulares que se estudian y desarrollan:

- **Componentes de conexión:** Estos componentes permiten establecer conexiones entre diferentes objetos dentro del entorno virtual. Pueden incluir funcionalidades para enlazar objetos de manera temporal o permanente, facilitando la creación de estructuras más complejas o la interacción entre distintos elementos.
- **Componentes de física:** Estos componentes se encargan de simular las propiedades físicas de los objetos en el entorno virtual. Pueden incluir características como la gravedad, la fricción, la resistencia al movimiento, entre otros aspectos, para lograr un comportamiento realista de los objetos en el espacio virtual.
- **Componentes de gravedad:** Estos componentes se enfocan específicamente en simular la fuerza de gravedad dentro del entorno virtual. Permiten que los objetos

respondan y se comporten de acuerdo con las leyes de la física, cayendo o siendo atraídos hacia abajo en función de la gravedad simulada.

- **Componentes de ensamblaje:** Estos componentes brindan la capacidad de ensamblar objetos de forma modular, permitiendo construir estructuras más complejas a partir de componentes individuales. Pueden incluir funcionalidades para unir piezas, alinear objetos o permitir su interconexión de manera intuitiva.

El componente de catálogo comprende un catálogo de artículos. Estos componentes modulares ofrecen flexibilidad y versatilidad a los usuarios al permitirles modificar y personalizar objetos de manera interactiva en el entorno virtual. Su implementación y uso adecuado pueden potenciar la creatividad y la capacidad de adaptación de los usuarios en el desarrollo de escenarios virtuales.

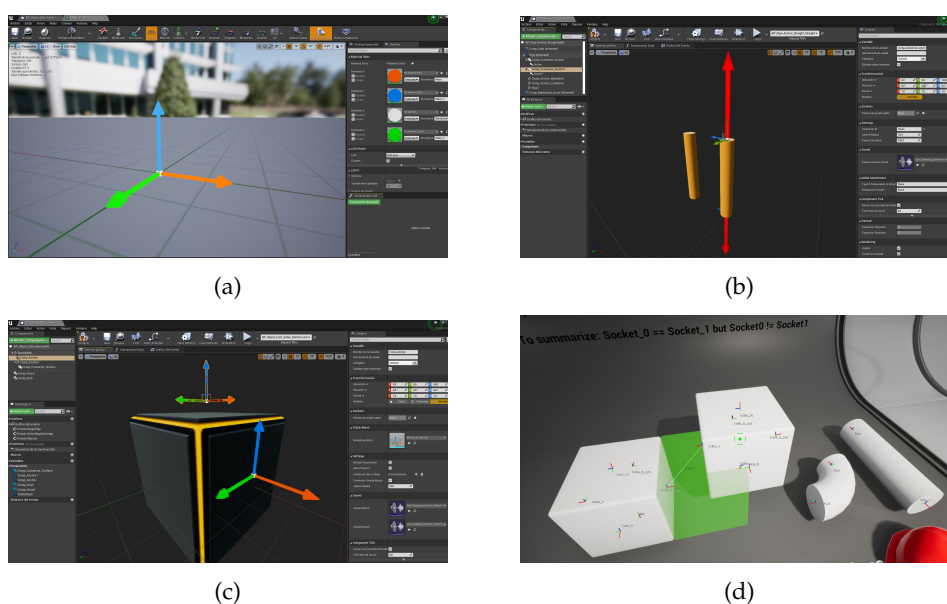


FIGURA 5.3: Componentes modulares de objetos. a) componentes de conexión; b) componentes de física; c) componentes de gravedad; d) componentes de ensamblaje.

5.2.2.2. Sistema de catálogo de componentes

La personalización de objetos es un tema que se ha estudiado en esta investigación, por lo que es necesario contar con una serie de multitud de objetos que pueden configurarse según las necesidades requeridas por el usuario. Es por esto que se ha creado un sistema de catálogo de componentes mediante Unreal Engine 4 que puede soportar la configuración personalizada de objetos, como se detalla a continuación.

- **Catálogo de componentes**

El componente de catálogo comprende un catálogo de artículos seleccionados en la visualización. En combinación con el componente de la interfaz de usuario, el catálogo se puede utilizar como generador de objetos o simplemente para proporcionar información de manera ordenada. La función del componente de

catálogo es actuar como un grupo de información que contiene todos los activos de datos de artículos ordenados por categorías principales y subcategorías. En la Figura 5.4 se muestra un diseño preliminar del catálogo de componentes.

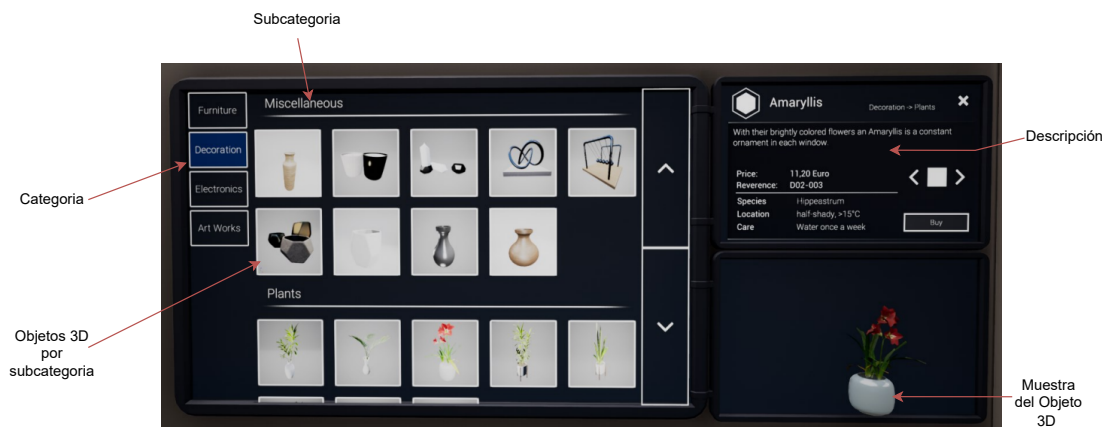


FIGURA 5.4: Catálogo de componentes para diseño modular.

5.2.2.3. Configuración y distribución flexible de componentes en área de trabajo

- *Sistema holograma*: Un sistema holográfico en un objeto modular de realidad virtual permite crear una representación tridimensional de un objeto en un ambiente virtual, ofreciendo una experiencia más realista al usuario. El sistema propuesto utiliza tecnología de proyección de hologramas para crear la ilusión de que el objeto está presente en el espacio físico del usuario, lo que le permite interactuar con el objeto de una manera más natural y eficiente. El sistema holográfico puede utilizarse para representar componentes o piezas que el usuario necesita ensamblar o personalizar.
- *Ubicación, eliminación y rotación de objetos*: En el sistema de realidad virtual para diseño modular, la ubicación, eliminación y rotación de objetos son tareas esenciales para crear y editar escenas virtuales. Dentro del entorno virtual, la ubicación de objetos se logra colocándolos en lugares específicos mediante herramientas de selección y arrastrar y soltar. También se pueden usar coordenadas para precisar su posición. La eliminación de objetos se hace seleccionándolos y presionando el botón de eliminación o usando una herramienta de borrado. La rotación de objetos implica cambiar su orientación en el espacio virtual, realizándose mediante herramientas de rotación o especificando un ángulo de rotación a través de coordenadas.
- *Manipulación de objetos*: En el sistema de realidad virtual se han desarrollado herramientas interactivas para que los usuarios puedan manipular los objetos en tiempo real, como la selección de objetos mediante gestos de mano o la manipulación directa mediante controladores de mano. Esto permite a los usuarios crear y modificar escenas virtuales de manera intuitiva y efectiva.

5.2.2.4. Sistema de interfaces de usuario y datos

Información de objetos mediante interfaces interactivas

La interfaz de usuario es muy importante para la interacción entre hombre máquina, por lo que en la aplicación se ha considerado incorporar una interfaz informativa para los componentes que se muestran en la distribución.

- *Interfaz de información del objeto*: Es un componente clave para brindar una experiencia inmersiva y satisfactoria al usuario. Esta interfaz permite al usuario interactuar con los objetos virtuales en el entorno de realidad virtual y obtener información relevante sobre ellos. La interfaz de información del objeto proporciona al usuario información detallada sobre los objetos virtuales, como su nombre, descripción, estado, propiedades y características. Esta información se puede presentar en forma de texto, imágenes, videos u otros medios interactivos, dependiendo de las necesidades del usuario y el contexto de uso. Además, la interfaz de información del objeto permite al usuario interactuar con los objetos virtuales de diversas formas, como seleccionándolos, manipulándolos, cambiando sus propiedades o accediendo a información adicional. Esto se logra mediante técnicas de interacción como gestos, comandos de voz, dispositivos de entrada y otros medios.
- *Interfaz de cambio de objetos*: En un sistema de diseño modular, la interfaz de cambio de objetos permite la combinación y reutilización de componentes para brindar flexibilidad y eficiencia. Debe permitir al usuario seleccionar y cambiar objetos de manera intuitiva mediante técnicas de interacción y proporcionar herramientas y controles para manipular y modificar los objetos. Además, debe permitir guardar y cargar configuraciones personalizadas de objetos, lo que es especialmente útil en entornos de diseño o simulación.
- *Interfaz de cambio de texturas*: La interfaz de cambio de texturas se construye de manera modular en un sistema de realidad virtual, lo que permite la combinación y reutilización de componentes para brindar flexibilidad y eficiencia. La interfaz debe permitir al usuario seleccionar y aplicar texturas a los objetos virtuales de manera intuitiva y eficiente, proporcionando herramientas y controles para manipular las texturas con precisión. También debe permitir el guardado y carga de configuraciones personalizadas de texturas, lo que es especialmente útil para proyectos donde se crean diferentes escenarios para comparación.
- *Interfaz de inventario de objetos*: La interfaz de inventario de objetos es un componente clave en los entornos de realidad virtual, ya que permite a los usuarios interactuar de manera eficiente con diferentes categorías y subcategorías de objetos para su selección y manipulación en el entorno. Al proporcionar una experiencia intuitiva y fácil de usar, los usuarios pueden dedicar más tiempo a construir y crear sin sentir cansancio. En definitiva, la interfaz de inventario de objetos es fundamental para mejorar la experiencia del usuario y hacer que la construcción en entornos de realidad virtual sea más efectiva y placentera.

5.2.2.5. Sistema multiusuario

El sistema multiusuario que se adapta en el sistema realidad virtual para diseño modular permite a múltiples usuarios interactuar en el entorno virtual compartido. Para que el sistema multiusuario funcione se construye el entorno virtual de manera modular, lo que permite la reutilización de componentes en diferentes partes del sistema. Esto permite a los usuarios colaborar y compartir experiencias en tiempo real, lo que es útil en entornos de trabajo colaborativo. La arquitectura modular del entorno 3D brinda flexibilidad y eficiencia en el desarrollo y mantenimiento del sistema, permitiendo actualizaciones y mejoras continuas.

5.3. Implementación de componentes de diseño modular aplicados al caso de estudio

En esta sección se presenta la aplicación del sistema de diseño modular en el caso de estudio.

Antecedentes del proyecto: Digital Factory Metaverse

El caso de estudio presentado para esta investigación puede detallarse en la sección 3.3 donde se realiza el diseño del proyecto *Digital Factory Metaverse* como entorno virtual para funcionar con realidad virtual. Para el caso de esta investigación se centrará específicamente en funcionalidades propias del diseño modular en el *Framework* de realidad virtual. Por lo que todas las funciones que se implementan serán un complemento al desarrollo presentado previamente.

Los siguientes componentes fueron agregados al proyecto *Digital Factory Metaverse* para esta investigación:

- Más de 60 assets nuevos de productos y máquinas para inventario por categorías y subcategorías.
- Programación de cada uno de los assets para funciones específicas de modularidad acorde a la Tabla 5.2.
- Mejoramiento del sistema general de *framework* para funcionamiento con realidad virtual.
- Nuevas funcionalidades de componentes enfocados a los sistemas modulares.
- Adaptación del sistema modular al multijugador.
- Creación de la documentación para el diseño modular (DDM) de plantas industriales a pequeña escala para el proyecto caso de estudio. Ver repositorio del proyecto para más detalle: <https://github.com/mickluis/framework-vr-metaverse>.

A continuación se muestra las principales funciones que se han integrado en el caso de estudio.

5.3.1. Creación de escenarios mediante componentes modulares

- Componentes modulares de objetos: Dentro de los componentes modulares desarrollados y probados en el proyecto están los componentes de colisión, componentes de física, componentes de gravedad y componentes de ensamblaje. Para ello, en la Figura 5.5a se muestran los componentes mencionados, se ha tomado como ejemplo una banda transportadora en la cual se puede hacer modificaciones en tiempo real acordes a las especificaciones de este componente.
- Configuración y distribución flexible de componentes en área de trabajo: La configuración de equipos, máquinas y componentes de forma modular permite hacer distribuciones precisas en el espacio a configurar. En la Figura 5.5b se muestra una máquina que mediante la realidad virtual puede ser ubicada según los requerimientos del usuario, pudiéndose ubicar en cualquier dirección o posición que se desee.
- Creación de escenarios mediante inventario de objetos: La personalización de objetos es un tema que ha estudiado en esta investigación, por lo que es necesario contar con una serie de multitud de equipos que pueden configurarse según las necesidades requeridas por el usuario. Esta opción permite configurar un sistema acorde a las necesidades del usuario mediante el uso de categorías y subcategorías personalizadas. En la Figura 5.5c se muestra el sistema de realidad virtual para configurar sistemas modulares por categorías y subcategorías.

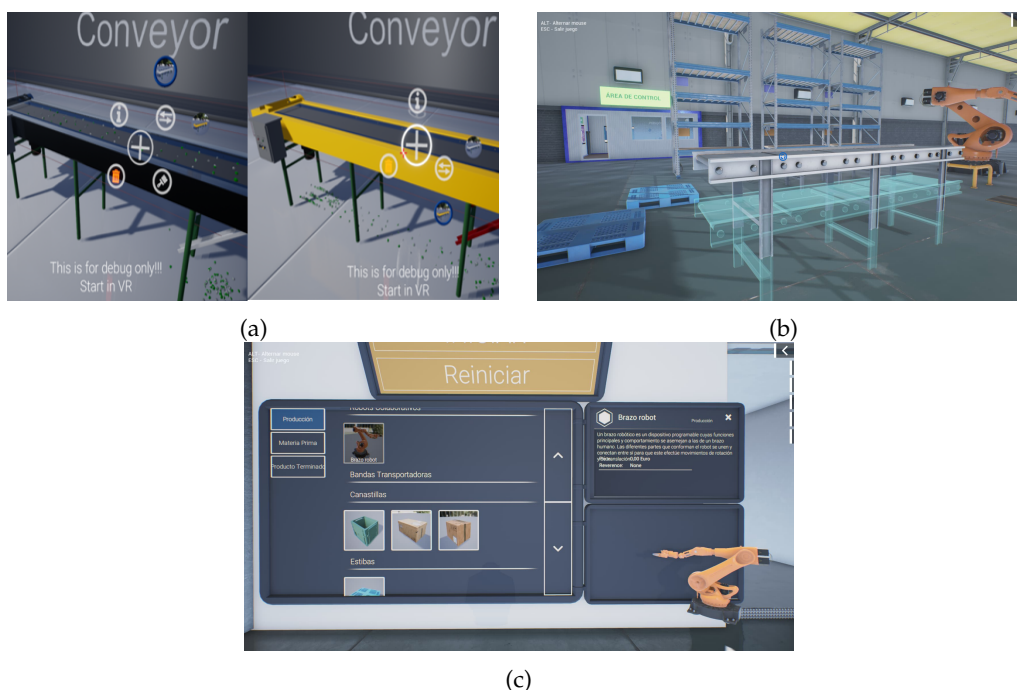


FIGURA 5.5: Componentes para el diseño modular. 5.5a componentes modulares de objetos; 5.5b configuración y distribución flexible de componentes; 5.5c creación de escenarios mediante inventario de objetos.

5.3.1.1. Sistema de interfaces de usuario y datos

- Información de objetos mediante interfaces interactivas: La interfaz de usuario es muy importante para la interacción entre hombre máquina, por lo que en la aplicación se ha considerado incorporar una interfaz informativa para los componentes que se muestran en la distribución. En la Figura 5.6 Se muestra una interfaz con información de la máquina, esto puede ayudarle a reconocer toda la información relacionada con la máquina y el proceso, en general todos los objetos disponen de interfaces de información, que relacionan la información disponible de cada para cada objeto.



FIGURA 5.6: Ejemplo de sistema de interfaces de usuario y datos.

5.3.1.2. Sistema multiusuario

- Aplicación del diseño modular en metaverso: El proceso que se llevó a cabo para utilizar el contenido del *framework* de realidad virtual para el proyecto *Digital Factory Metaverse*, con enfoque de diseño modular fue mediante la ejecución a través de un servidor/nube de Epic Games para UE5, aquí los participantes mediante disposición de los equipos de realidad virtual y un entrenamiento previo de controles y uso se ejecutó la aplicación en las sesiones programadas donde los participantes realizaron actividades dentro del mundo virtual de forma colaborativa, desde una noción básica en las primeras sesiones, hasta una experimentación avanzada dentro del mundo virtual sobre el manejo y apoderamiento de las herramientas del diseño modular para configuración y creación de escenarios en tiempo real de una *Smart Factory*. La experiencia multiusuario de los participantes para diseño modular se logró de manera exitosa, para ver detalles de uso ver el capítulo 7.

La Figura 5.7 muestra el modelo de colaboración basado en avatar que se implementó en el aplicativo.



FIGURA 5.7: Modelo de colaboración basado en avatar que se implementó en el entorno virtual.

5.4. Conclusiones

La incorporación del diseño modular en el contexto de plantas de producción en *Smart Factory* es abordada en este capítulo. Se propone el desarrollo progresivo de una función de diseño modular para el sistema de *framework* principal de realidad virtual presentado anteriormente. Esta función tiene como objetivo generar espacios y elementos 3D que se basen en conceptos modulares, lo que permitirá su replicabilidad y adaptabilidad a las necesidades y problemáticas específicas de los sistemas de producción en las empresas.

La función de diseño modular propuesta busca ofrecer flexibilidad y ajuste a diferentes casos y criterios de implementación. Al ser capaz de generar espacios y elementos 3D adaptados a las necesidades de cada sistema de producción, se pueden brindar las funcionalidades requeridas en cada caso específico. Esto implica que las soluciones modulares pueden adaptarse al ritmo de implementación y al criterio de las empresas, lo que resulta beneficioso para la optimización de los procesos de producción.

El desarrollo de una función de diseño modular en el *framework* de realidad virtual es una aproximación inicial en este capítulo. Esta propuesta tiene el potencial de mejorar la forma en que se diseñan y distribuyen las plantas de producción en entornos de *Smart Factory*. Al permitir la generación de espacios y elementos 3D modulares, se abre la posibilidad de crear infraestructuras flexibles y adaptables a los cambios en la producción, lo que puede contribuir a una mayor eficiencia y productividad en las operaciones industriales.

Integración de una función basada en monitorización de procesos para Smart Factory

6.1. Motivación

La monitorización de datos es una herramienta cada vez más frecuente en aplicaciones digitales debido a la necesidad de presentar conjuntos de datos complejos de forma organizada, atractiva y comprensible para los usuarios. En entornos virtuales, esta necesidad se vuelve aún más crucial, ya que se busca que el usuario pueda visualizar los datos de manera rápida y eficiente para facilitar la comprensión de grandes volúmenes de información.

En este capítulo se propone el desarrollo progresivo de una nueva funcionalidad basada en la monitorización de procesos para el *framework* de realidad virtual propuesto en esta investigación. El enfoque principal de esta funcionalidad es la utilización de interfaces gráficas para la visualización de datos en el entorno virtual, lo cual permite la presentación de estadísticas, análisis y visualización de datos. Los usuarios tienen la capacidad de interactuar y navegar con la información en tiempo real, lo que facilita la comprensión y análisis de los datos.

Se implementó un sistema de monitorización utilizando herramientas de análisis de datos y simulación como Flexsim, MySQL y Power BI. Estas herramientas se integraron en el sistema mediante dashboards informativos que incluyen gráficos, tablas y otros elementos visuales. La información generada se presenta en pantallas ubicadas en diferentes áreas de la fábrica, como administración, producción y almacenes. El objetivo de esto es que los usuarios puedan tomar decisiones informadas basadas en datos de calidad presentados en un entorno virtual. Además, este entorno virtual permite a los usuarios interactuar entre sí, discutir los datos y tomar decisiones de manera conjunta.

6.2. Propuesta de integración de una función basada en monitorización de procesos para Smart Factory en el Framework principal de realidad virtual y metaverso

En este capítulo se propone la integración de una nueva función para el desarrollo de un sistema de monitorización de procesos para *Smart Factory* en el *framework* principal del sistema de realidad virtual y metaverso propuesto en el capítulo 4, así como complemento a la función de diseño modular propuesto en el capítulo 5. Para el desarrollo de esta función se ha realizado un estudio basado en los sistemas de monitorización, sus tipos, niveles y relación con la analítica de datos, así como una metodología de uso y aplicación de la monitorización en los procesos de *Smart Factory* mediante sistemas avanzados de realidad virtual.

También se han desarrollado componentes que se han programado siguiendo una estructura que permite la interacción de datos e interfaces en tiempo real, vinculados a través de una data propia del aplicativo y de terceros como Flexsim, MySQL y Power BI. En la Figura 6.1 se muestra la estructura del *framework* basado en monitorización, el cual funciona como un sistema complementario al *framework* principal de realidad virtual propuesto en la investigación en una versión 4.0.

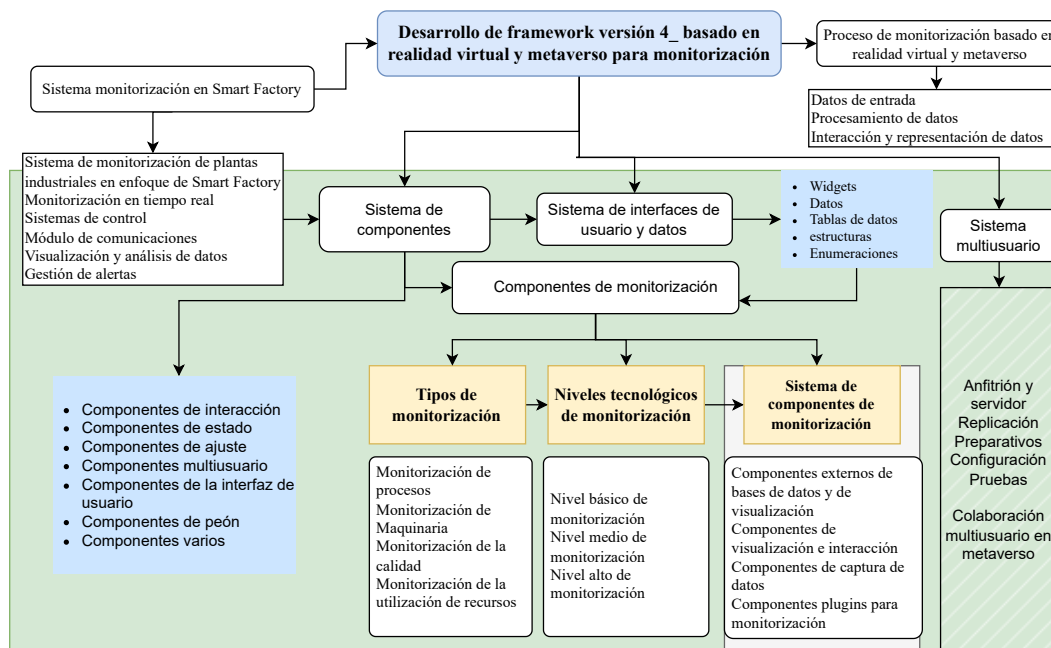


FIGURA 6.1: Integración de una función basada en monitorización de procesos para Smart Factory en Framework principal.

A continuación se describe los aspectos más destacados del sistema de monitorización acorde a la Figura 6.1.

6.2.1. Sistema monitorización en Smart Factory

En esta sección se explican algunos de los temas tratados en este capítulo, como, por ejemplo, el papel que juega la realidad virtual en un contexto de *Smart Factory*. También se aborda la relación entre la información y los datos en una *Smart Factory*, y cómo se pueden visualizar en un contexto de Industria 4.0. Además, se destaca la importancia de la monitorización en la Industria 4.0 y se explora cómo se puede visualizar en una aplicación de realidad virtual.

6.2.1.1. Sistema de monitorización de plantas industriales en enfoque de Smart Factory

La monitorización de plantas industriales es una actividad que permite recopilar, analizar y gestionar información sobre el rendimiento de los procesos y equipos industriales. Esto ayuda a detectar y corregir problemas, mejorar la eficiencia y reducir los costos. La monitorización se realiza a través de sensores y dispositivos de medición que se instalan en los equipos y procesos para recopilar datos, y se utilizan sistemas de información para recoger, almacenar, procesar y visualizar los datos recolectados. Además, la monitorización industrial también ayuda a cumplir con los estándares de seguridad y medio ambiente, garantizando la calidad de los productos y servicios.

Algunos sistemas de monitorización de plantas industriales que se pueden estudiar son los siguientes:

- *Monitorización en tiempo real*: En una planta industrial, los equipos y sistemas están interconectados y son controlados por sensores y dispositivos conectados a internet de las cosas (IoT), lo que genera una gran cantidad de datos que deben ser analizados y procesados en tiempo real. La monitorización en tiempo real permite detectar anomalías y desviaciones en el funcionamiento de los equipos y sistemas, así como prevenir fallos en cascada, lo que puede afectar a todo el proceso de producción.
- *Sistemas de control*: Hay varias ventajas en el uso de sistemas de control y monitorización en la industria. Una de las principales es la capacidad de controlar y supervisar los procesos automatizados en tiempo real. Esto permite a las empresas tener una comprensión precisa de cómo está operando su maquinaria y detectar problemas antes de que causen pérdidas económicas o de tiempo. Además, estos sistemas permiten la creación de informes en vivo y el almacenamiento de datos para su revisión posterior. También ayudan a prevenir errores y fallas y permiten controlar y supervisar la maquinaria a distancia.
- *Módulo de comunicaciones*: Las redes o módulos de comunicaciones industriales, son esenciales en cualquier sistema de automatización, ya que proporcionan un medio para compartir información, controlar y monitorear los datos y conectar diferentes dispositivos. Sin estas redes, la automatización sería mucho menos eficiente y no podría lograr su objetivo principal mejorar la eficiencia y la productividad. Una red industrial y un protocolo son herramientas fundamentales para

lograr que esta comunicación sea eficiente.

- **Visualización y análisis de datos:** La visualización de datos es clave en una planta de producción, ya que permite la representación gráfica de información numérica o estadística, facilitando su comprensión. La visualización de datos permite identificar patrones y tendencias en grandes conjuntos de datos, además de valores anómalos de manera inmediata. Esta herramienta permite contar historias a través de los datos, entendiendo información compleja de forma clara y concisa. Además, puede ayudar a monitorear procesos, detectar problemas y optimizar la eficiencia y el rendimiento de la producción en tiempo real.
- **Gestión de alertas:** La gestión de alertas tiene como objetivo detectar problemas potenciales antes de que causen daños significativos y garantizar una respuesta rápida y efectiva a los problemas que surgen. Para lograr esto, se pueden configurar reglas y límites para detectar eventos, establecer la frecuencia y la prioridad de las notificaciones y asignar responsabilidades para responder a las alertas. La implementación de un software especializado puede automatizar este proceso y estar integrado con otros sistemas. Además, un sistema de gestión de alertas puede tener una interfaz de usuario para ver y responder a las alertas, una herramienta de análisis de datos para identificar patrones y tendencias y un registro de eventos para rastrear respuestas y acciones tomadas.

6.2.1.2. Tipos de monitorización en Smart Factory

Unos de los objetivos de la monitorización industrial es garantizar la eficiencia y seguridad de los procesos, asegurando que los equipos y maquinarias funcionen correctamente y cumpliendo con los estándares de calidad y seguridad. En este orden de ideas se presentan cuatro tipos de monitorización que actúan en función de los tipos de monitorización que se pueden encontrar en una *Smart Factory*:

- **Monitorización de procesos:** Se utiliza sensores y dispositivos de monitorización para recopilar datos sobre los procesos de producción en sí mismos, como el tiempo de ciclo, la calidad de los productos, etc. Estos datos pueden ser visualizados en un dashboard o monitor para permitir a los operadores y supervisores monitorear y optimizar los procesos de producción.
- **Monitorización de Maquinaria:** Es una solución destinada a ayudar a incluir capacidades de monitorización en las máquinas para controlar los procesos productivos que suceden en tiempo real, las máquinas pueden arrojar diferente tipo de información que puede ser de gran importancia para las empresas en términos de costos, tiempos y otras métricas de producción. Para obtener los datos generados por las máquinas, estas deben estar automatizadas mediante sistemas de sensores y actuadores conectados mediante sistemas inteligentes de control y monitorización.

- **Monitorización de la calidad:** Los sistemas de monitorización de la calidad pueden utilizar sensores y dispositivos de medición para evaluar la calidad de los productos en tiempo real y detectar problemas o deficiencias. Estos datos también pueden ser visualizados en un dashboard o en un entorno de realidad virtual para permitir a los operadores y supervisores monitorear y mejorar la calidad de los productos.
- **Monitorización de la utilización de recursos:** Los sistemas de monitorización de la utilización de recursos pueden utilizar sensores y dispositivos de monitorización para recopilar datos sobre el uso de energía, agua, materiales, etc., en la fábrica. Estos datos pueden ser visualizados en un dashboard o en un entorno de realidad virtual para permitir a los operadores y supervisores monitorear y optimizar el uso de los recursos.

6.2.1.3. Niveles tecnológicos de monitorización de procesos industriales

Se presenta 3 niveles de monitorización de procesos industriales, que incluye:

- **Nivel básico de monitorización:** En este nivel se utiliza la tecnología de pantallas HMI (Human Machine Interface), las cuales muestran información sobre el rendimiento de los equipos, consumo de energía, niveles de inventario, velocidad de producción, entre otros aspectos relevantes para la gestión del proceso. Estas pantallas presentan la información de manera virtual a través de gráficos, tablas y diversas herramientas de interfaz gráfica, permitiendo una fácil comprensión y monitoreo del estado del sistema de producción.
- **Nivel medio de monitorización:** En este nivel de tecnología, se utiliza el sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) para recopilar y visualizar datos. Este sistema cuenta con características como el almacenamiento de datos históricos, generación de informes y alarmas, así como la automatización de los procesos. A través de sensores y PLC, el usuario especializado puede monitorear y controlar los recursos vinculados a la red del sistema. Además, el sistema SCADA permite la programación de automatización mediante la creación de scripts para controlar y ajustar los procesos de manera automatizada.
- **Nivel alto de monitorización:** La tecnología utilizada para controlar y monitorear procesos, se caracteriza por tener una arquitectura distribuida, lo que significa que el sistema está compuesto por una red de controladores, sensores y actuadores que están distribuidos a lo largo de la planta industrial que recolectan información en tiempo real de los procesos; de esta manera se tiene un control automático de operaciones además de un almacenamiento de datos históricos y la generación de informes y alarmas. También este sistema tecnológico permite la programación automática de los procedimientos y la comunicación con sistemas externos como los sistemas SCADA.

6.2.1.4. Relación entre la monitorización y la analítica de datos en Smart Factory

La monitorización y la analítica de datos son procesos fundamentales en las empresas para recopilar, analizar y utilizar información. La monitorización se refiere a la recolección constante de datos de un sistema o proceso para detectar problemas en tiempo real y tomar medidas correctivas inmediatas antes de que se produzcan daños mayores. Por otro lado, la analítica de datos implica examinar, limpiar, transformar y modelar los datos para obtener información valiosa y descubrir patrones y tendencias que puedan ayudar en la toma de decisiones empresariales.

Ambos procesos están interconectados y son importantes para el éxito de una empresa. La monitorización de datos permite tomar decisiones inmediatas y eficaces para prevenir o solucionar problemas, mientras que la analítica de datos permite transformar los datos recolectados en información útil y relevante para la empresa, lo que ayuda en la toma de decisiones a largo plazo (ver Figura 6.2). Por lo tanto, una empresa debe implementar ambos procesos para mejorar la eficiencia, productividad y la toma de decisiones.

Esta investigación está enfocada en las tareas realizadas por los analistas de datos y no por los científicos de datos. Los analistas de datos se encargan de recolectar, limpiar, analizar y visualizar datos con el objetivo de obtener información valiosa para la organización, mientras que los científicos de datos utilizan técnicas avanzadas de análisis de datos y aprendizaje automático para resolver problemas complejos.



FIGURA 6.2: Relación entre la monitorización y la analítica de datos en Smart Factory.

6.2.1.5. Sistemas de monitorización basados en realidad virtual y metaverso dentro de un contexto de Smart Factory

Un sistema de monitorización basado en realidad virtual proporciona una representación tridimensional de un entorno o un proceso para facilitar su supervisión y control. Esto permite a los usuarios ver, explorar y manipular un entorno virtual de manera similar a como lo harían en el mundo real, a consecuencia, ayudar en la toma de decisiones, reducir errores y mejorar la eficiencia en una variedad de aplicaciones,

como la monitorización de procesos industriales, la planificación de la construcción, la simulación de entrenamiento y la medición de desempeño.

La monitorización de procesos utilizando realidad virtual y metaverso dentro de un contexto de *Smart Factory* puede proporcionar una vista en tiempo real de los procesos de producción, lo que permite una mayor eficiencia y reducción de costos en la fabricación. En la Figura 6.3 se pueden observar un ejemplo de visualización de una *Smart Factory* con realidad virtual, donde los usuarios pueden interactuar con el entorno virtual utilizando dispositivos de entrada, como guantes con sensores o controladores, y pueden recibir retroalimentación en tiempo real sobre el estado del sistema.

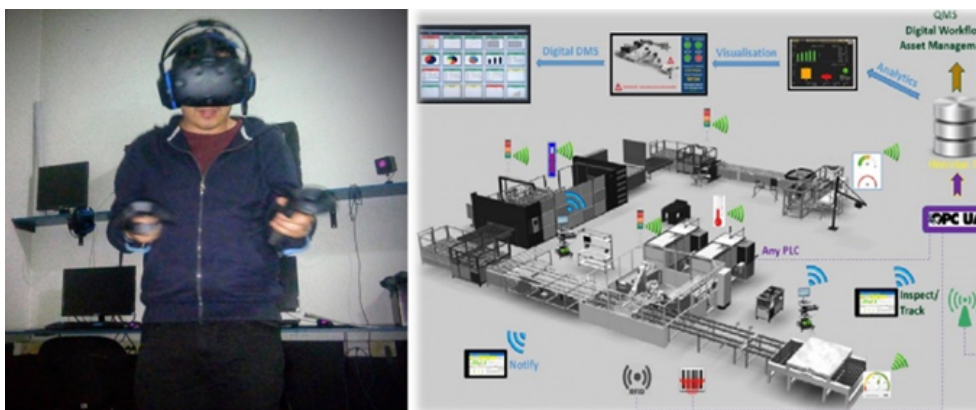


FIGURA 6.3: Representación de la monitorización de una fábrica inteligente que puede ser simulada con realidad virtual.

Los siguientes son los pasos que se pueden seguir para llevar a cabo la monitorización de procesos utilizando realidad virtual y metaverso:

- **Definir los objetivos de la monitorización:** Antes de comenzar a implementar la monitorización utilizando la realidad virtual y metaversos, es importante definir claramente los objetivos de la monitorización. Estos objetivos pueden incluir mejorar la eficiencia de la producción, reducir los costos, minimizar los errores y mejorar la seguridad.
- **Identificar los procesos críticos:** Una vez que se han definido los objetivos, es importante identificar los procesos críticos que se deben monitorear. Estos procesos críticos pueden ser aquellos que tienen el mayor impacto en la eficiencia, la calidad o la seguridad de la producción.
- **Seleccionar la plataforma de realidad virtual y metaverso adecuada:** Para implementar la monitorización utilizando realidad virtual y metaversos, se debe seleccionar la plataforma adecuada que permita visualizar los procesos en tiempo real y realizar análisis en profundidad. Hay varias opciones disponibles, como Oculus, HTC Vive, Unity, Unreal Engine y otras plataformas de realidad virtual.
- **Crear modelos de los procesos:** Una vez que se ha seleccionado la plataforma de realidad virtual y metaverso, se deben crear modelos 3D de los procesos que

se desean monitorear. Estos modelos se pueden utilizar para crear una representación visual de los procesos, lo que permite a los operadores y supervisores comprender mejor cómo se está llevando a cabo la producción.

- **Integrar sensores IoT:** Para obtener datos en tiempo real sobre los procesos de producción, se deben integrar sensores IoT en el sistema. Estos sensores pueden medir la temperatura, la humedad, la presión y otros factores relevantes para la producción.
- **Visualizar y analizar los datos:** Con la plataforma de realidad virtual y metaverso seleccionada, los modelos creados y los sensores IoT integrados, se pueden visualizar y analizar los datos en tiempo real. Esto permite a los operadores y supervisores identificar problemas y tomar medidas correctivas de inmediato.

6.2.2. Proceso de monitorización basado en realidad virtual y metaverso dentro de un contexto de Smart Factory

Para el análisis del sistema de monitorización en *Smart Factory*, se siguió un proceso adaptado de [97] que describe un sistema de comunicación de datos. En el sistema propuesto, se establece una relación entre estos sistemas, centrándose en la entrada de datos, el procesamiento de información y la interacción y representación de datos mediante realidad virtual. La Figura 6.4 ilustra la estructura del proceso utilizado en este estudio para monitorización.

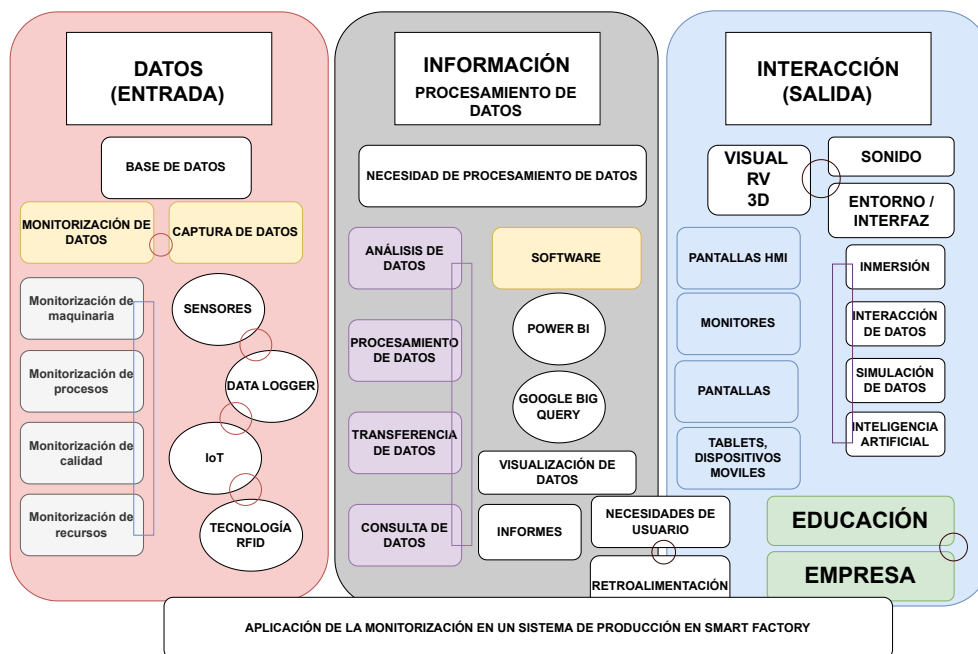


FIGURA 6.4: Proceso de monitorización basado en realidad virtual y metaverso dentro de un contexto de Smart Factory.

El proceso de monitorización basado en realidad virtual y metaverso en el contexto

de *Smart Factory* consta de tres fases principales: entrada de datos, procesamiento de información e interacción y representación de datos mediante realidad virtual.

- **En la fase de entrada de datos**, se busca la integración de sistemas de información y comunicación en toda la planta de producción. Se establece un flujo adecuado para capturar, procesar e interpretar los datos generados por diversas fuentes, como sensores instalados en las máquinas, IoT, tecnología RFID, entre otros. Esta fase garantiza la recolección de datos relevantes para el sistema de monitorización.
- **Una vez que la información es capturada, se procede a la fase de procesamiento de la información.** Aquí, se realiza un análisis de datos consultando las necesidades de los clientes o proveedores y se lleva a cabo una retroalimentación de dicho análisis. En esta etapa, se emplean técnicas y herramientas para procesar y comprender los datos recopilados, permitiendo identificar patrones, tendencias y tomar decisiones informadas.
- **La última fase del proceso se centra en la interacción y representación de datos mediante realidad virtual.** En esta etapa, se utilizan herramientas visuales y de simulación para mostrar los datos de manera gráfica y comprensible. A través de dispositivos de realidad virtual, los usuarios pueden visualizar e interactuar con los datos procesados, lo que facilita la comprensión del sistema productivo y permite tomar acciones correctivas o de mejora.

6.2.3. Sistema de componentes de monitorización integrados en el framework de realidad virtual

Se presenta el desarrollo e implementación de componentes de monitorización para realidad virtual en el *framework*, especialmente en la monitorización de plantas de producción en *Smart Factory*. Estos componentes incluyen funcionalidades que se pueden adjuntar a clases e instancias de actores previamente desarrollados, lo que permite una personalización fácil y un intercambio libre de información basado en UI. Los componentes se organizan según su funcionalidad principal, como se muestra en la Figura 6.5.

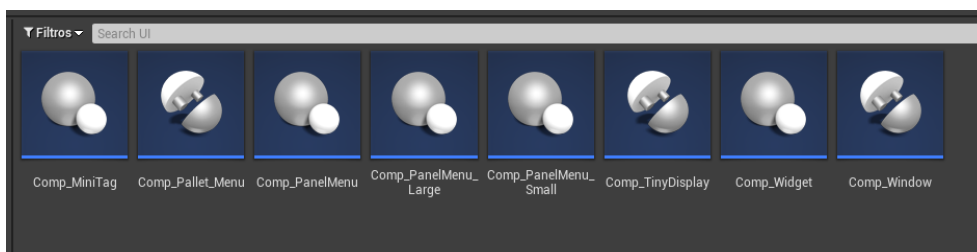


FIGURA 6.5: Sistema de componentes de monitorización integrados en el framework de realidad virtual.

Los componentes que se muestran en la figura anterior se pueden trabajar de forma conjunta o individual para interfaces de monitorización, de esto se resume los

componentes principales para proyectos basados en realidad virtual, como se muestra en la Figura 6.6.

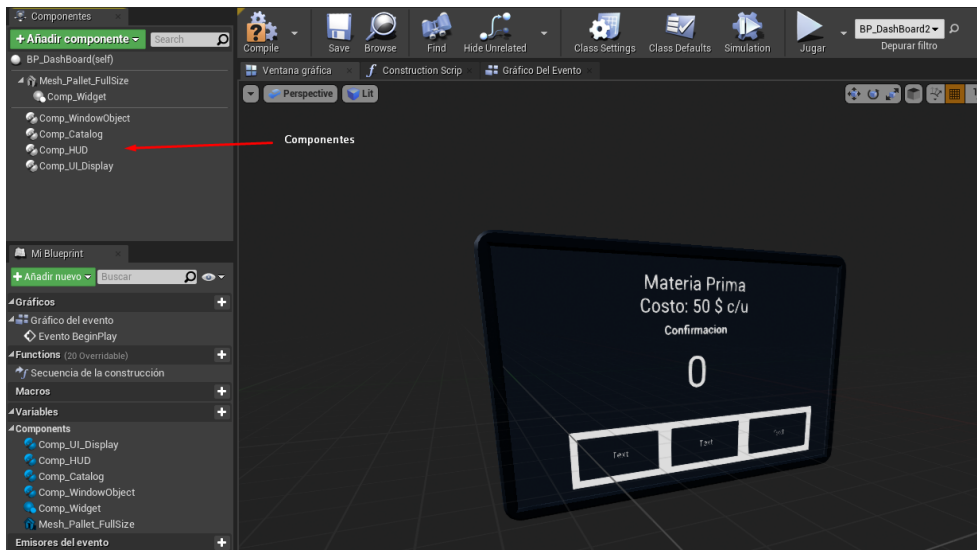


FIGURA 6.6: Implementación de los componentes en el framework.

6.2.3.1. Componentes de bases de datos, simulación y de visualización

Se ha utilizado el software MySQL y Power BI para complementar el sistema de monitorización. MySQL se ha utilizado como base de datos escalable y de alto rendimiento para almacenar y procesar grandes volúmenes de datos generados en los procesos productivos, por otra parte, se ha utilizado la simulación con el software FFlexsim para generar los datos de los procesos. Power BI, por otro lado, se ha utilizado para la generación de informes y visualizaciones avanzadas, brindando a los usuarios una visión clara y comprensible de los datos recopilados.

Asimismo, se ha desarrollado componentes para bases de datos en el *framework* que permite la recopilación, almacenamiento y análisis de información generada por los software externos. Este sistema de componentes posibilita la generación de informes y estadísticas relevantes, mejorando la toma de decisiones y la optimización de los procesos industriales. Estos componentes garantizan que los usuarios tengan acceso a información precisa y actualizada para una monitorización efectiva de la planta de producción. Con la combinación de Unreal Engine, Flexsim, MySQL y Power BI, se ha logrado crear un sistema integral y robusto de monitorización y análisis de datos en tiempo real para el *framework*.

6.2.3.2. Componentes de visualización e interacción

Estos componentes se encargan de proporcionar una interfaz de visualización y permitir la interacción del usuario con los datos de monitorización en un entorno de realidad virtual. Se han diseñado dashboards de control y gráficos interactivos

que permiten la visualización de indicadores clave y datos en tiempo real utilizando los componentes desarrollados. La Figura 6.7 muestra un diseño de interfaz donde los usuarios pueden explorar y manipular estos datos utilizando gestos y acciones intuitivas, lo que facilita el análisis y la toma de decisiones basadas en la información obtenida.

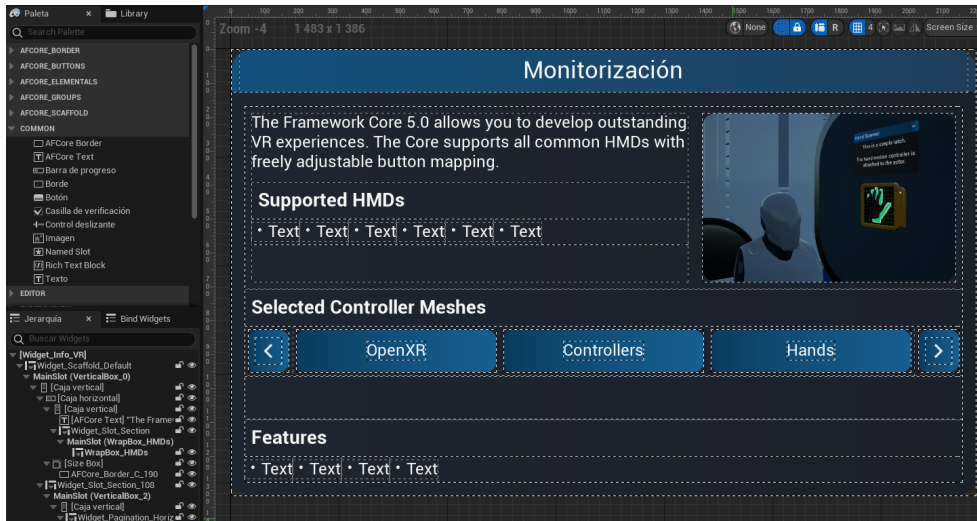


FIGURA 6.7: Componentes de visualización e interacción.

6.2.3.3. Componentes de captura de datos

La captura de datos es fundamental para la monitorización en tiempo real. Para ello, los componentes para la recolección y registro de datos se han implementado mediante diferentes sensores y dispositivos de captura que recopilan información sobre variables de las máquinas, productos y procesos, así como la interacción directa con humano máquina.

Estos componentes de captura de datos se encargan de recopilar la información de manera continua y transmitirla a las bases de datos correspondientes. La integración de estos componentes en el *framework* de realidad virtual permite una monitorización exhaustiva y detallada de la planta de producción, brindando a los usuarios una visión completa y precisa del estado y rendimiento de los diferentes sistemas.

La Figura 6.8 muestra el diseño y desarrollo de sistemas de sensores para captura de datos en máquinas desarrollados en el *framework* de realidad virtual para sistemas de monitorización, los sistemas de sensores dentro de la Smart Factory capturan diferente tipo de información acorde a la realidad.

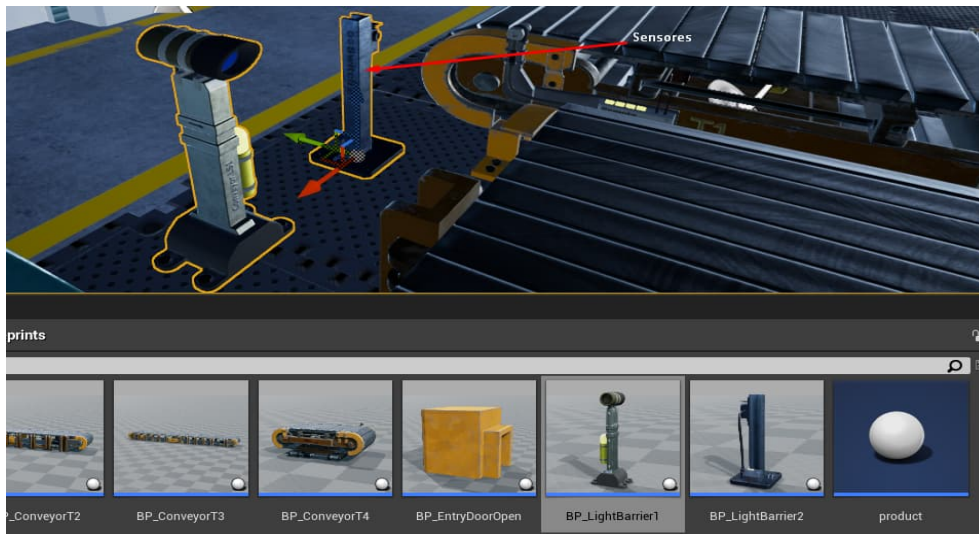


FIGURA 6.8: Sistema de componentes de captura de datos.

6.2.3.4. Componentes plugins para monitorización

En el contexto de esta investigación, se lleva a cabo la integración de Unreal Engine con plugins de monitorización obtenidos de la tienda de Epic Games. Esta integración se logra mediante la utilización de una serie de plugins que se destacan por su capacidad para establecer conexiones en tiempo real, lo cual permite la transferencia de datos y la interacción entre Unreal Engine y programas externos.

Los plugins utilizados se describen a continuación.

- El primer plugin destacado es "View web", el cual permite establecer una conexión entre Unreal Engine y URLs de internet. Esto significa que se puede cargar contenido web directamente dentro del motor de juego, lo que puede ser útil para mostrar paneles de control, información en tiempo real o incluso aplicaciones web completas dentro de la interfaz de Unreal. Esto facilita la integración de contenido externo y la visualización de datos provenientes de fuentes en línea.
- El siguiente plugin es "Web server for Unreal", el cual actúa como un servidor que permite la conexión de datos en tiempo real. Este plugin posibilita la comunicación bidireccional entre Unreal Engine y otros programas o dispositivos externos a través de protocolos como HTTP o WebSocket. De esta manera, se puede enviar y recibir datos en tiempo real, lo que abre un amplio abanico de posibilidades para la interacción y la creación de experiencias inmersivas.
- El plugin "Socket.io" también desempeña un papel fundamental en la integración, ya que se utiliza para conectar Unreal Engine con aplicaciones basadas en el protocolo de comunicación Socket.IO. Este protocolo permite la comunicación bidireccional y en tiempo real entre el motor de juego y otras aplicaciones o servicios externos. Al aprovechar Socket.IO, se pueden desarrollar soluciones

interactivas y colaborativas que aprovechen la potencia de Unreal Engine y la conexión en tiempo real.

- El plugin "Json" se utiliza para la manipulación de datos en formato JSON. JSON (JavaScript Object Notation) es un formato comúnmente utilizado para estructurar datos y transmitirlos de manera eficiente entre diferentes sistemas. Al integrar este plugin, se facilita el procesamiento y la interpretación de datos en formato JSON dentro de Unreal Engine, lo que permite una mayor flexibilidad en la gestión de información y la interacción con otros sistemas externos.

6.3. Sistema de monitorización aplicado en el caso de estudio

En esta sección se presenta la implementación del sistema de monitorización en las diferentes áreas de la planta de producción bajo el concepto de *Smart Factory*, mediante los diferentes componentes de monitorización. Para mostrar el sistema de monitorización se construyeron diferentes tipos de dashboards para representar los monitores según su función. El proceso de desarrollo e implementación se llevó a cabo mediante una experimentación de planeación, verificación y análisis de datos acorde a los indicadores que se presentan en la sección 6.3.1.

Los nuevos elementos agregados al caso de estudio *Digital Factory Metaverse*, para monitorización, son:

- Más de 30 assets nuevos de sistemas de monitorización para la planta de producción.
- Programación de cada uno de los assets para funciones específicas de monitorización.
- Vinculación de bases de datos de información específica de producción de la planta para analítica de datos en tiempo real.
- Creación de dashboards para visualización de datos en el aplicativo.
- Mejoramiento del sistema general del *Framework* para funcionamiento con realidad virtual.

A continuación se describe los resultados más relevantes para diseño y aplicación de sistemas de monitorización.

6.3.1. Indicadores KPI para una monitorización

Los indicadores presentados para el caso de estudio del proyecto *Digital Factory Metaverse* están basados en los principales datos que pueden ser utilizados en una fábrica de producción real, por tanto, se ha tomado como referencia dentro de la monitorización la realización de una clasificación de indicadores de producción dividida por tipo de monitorización, esto permitirá posteriormente representar los datos mediante dashboards en pantallas de monitorización dentro de todo el proceso productivo de la planta.

A continuación se muestra los KPI por tipo de monitorización, los cuales se han tomado bajo estudio de sistemas de producción para *Smart Factory*. Los datos específicos de los KPI dependerán de la situación en tiempo y espacio que se desarrolle las actividades de producción.

6.3.1.1. Indicadores de monitorización de maquinaria

En la monitorización de maquinaria en *Smart Factory*, se utilizan diferentes KPI para evaluar y medir el rendimiento de las máquinas. Estos KPI abarcan aspectos como el tiempo de actividad, los tiempos de inactividad planificados y no planificados, la eficiencia del equipo, la utilización de la máquina, la velocidad y capacidad de producción, entre otros. Para esta investigación se ha incluido en monitorización estos KPI para ser utilizados mediante realidad virtual.

Los KPI que se muestran en la Tabla 6.1 se pueden visualizar en pantallas HMI (Interfaz Hombre-Máquina) que tienen un tamaño de entre 7 a 15 pulgadas diseñados en Realidad Virtual. Estas pantallas se encuentran ubicadas estratégicamente alrededor de los diferentes procesos de la planta. A continuación, se muestra los principales indicadores a nivel de equipos y máquinas que se pueden analizar de forma individual o grupal, dependiendo de la máquina específica que se esté analizando.

Indicadores	Fórmula	Descripción
Tiempo de actividad	Tiempo de actividad / tiempo total	Mide la cantidad de tiempo que la máquina está en funcionamiento
Tiempo de inactividad planificado	Tiempo de inactividad programado / tiempo total	Mide el tiempo de inactividad planificado
Tiempo de inactividad no planificado	Tiempo de inactividad no programado / tiempo total	Mide el tiempo de inactividad no planificado
Eficiencia del equipo	Piezas producidas / tiempo de ciclo de la máquina	Mide la eficiencia del equipo
Nivel de utilización de la máquina	Piezas producidas / capacidad de producción de la máquina	Mide la capacidad de producción de la máquina
Velocidad de producción	Cantidad de piezas producidas / tiempo de producción	Mide la velocidad de producción de la máquina
Capacidad de producción	Es la cantidad máxima de productos que se pueden producir en un día.	(Cantidad de máquinas) x (Cantidad de horas trabajadas por día) x (Eficiencia de la máquina)
Tiempo de ciclo	Es el tiempo en que se necesita para producir un producto completo en una máquina.	(Duración del ciclo) + (Tiempo de preparación de la máquina)
Tasa de rechazo	Es el porcentaje de productos que no cumplen con los estándares de calidad.	(Cantidad de productos defectuosos producidos) / (Cantidad total de productos producidos)
Disponibilidad de maquinaria	Es el porcentaje de tiempo que las máquinas están disponibles para la producción.	(Tiempo de producción) / (Tiempo total de producción y mantenimiento)
Alarmas de fallo	Es el número promedio de alarmas de fallo por semana de producción.	(Cantidad de alarmas de fallo) / (Tiempo de producción)
Consumo de energía	Es el consumo promedio de energía, por producto producido.	Consumo total de energía/ Cantidad de productos buenos producidos
Tiempo de mantenimiento programado	Es el porcentaje de tiempo dedicado al mantenimiento de las máquinas.	(Tiempo total de mantenimiento) / (Tiempo de producción)

TABLA 6.1: Indicadores de monitorización de equipos y máquinas en Smart Factory.

6.3.1.2. Indicadores de monitorización de procesos

La Tabla 6.2 presenta KPI de monitorización de procesos que se muestran en las pantallas HMI con tamaños entre 7 y 29 pulgadas, así como en pantallas de computadoras, tabletas y dispositivos móviles ubicados en el área de control de la *Smart Factory*. Estos indicadores se han seleccionado en función de su relevancia en los procesos productivos y se han clasificado por áreas, como producción, logística, almacenes, cadena de suministro, compras y ventas.

En el área de producción, se monitorean indicadores como la productividad, que mide la cantidad de productos o unidades producidas en un período de tiempo determinado, y la calidad de producción, que evalúa el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos. También se registran el tiempo de inactividad planificado y no planificado, el tiempo de ciclo, que es el tiempo promedio para completar un ciclo de producción, y el OEE (Eficiencia Global del Equipo), que es una métrica que combina la disponibilidad, rendimiento y calidad de una máquina o línea de producción.

En el área de logística, almacenes y cadena de suministro, se monitorean indicadores como la tasa de cumplimiento del pedido, que evalúa la capacidad de entregar los pedidos a tiempo, el costo de transporte, que registra los gastos relacionados con el transporte de productos, la rotación de inventario, que mide la frecuencia con la que los productos se venden y se reponen en el inventario, y el nivel de inventario, que registra la cantidad de productos disponibles en el almacén. También se monitorea el tiempo de entrega, que registra el tiempo que transcurre desde que se realiza un pedido hasta que se entrega, y el índice de calidad del proveedor, que evalúa la calidad y confiabilidad de los proveedores.

En las áreas de compras y ventas, se monitorean indicadores como los ingresos totales, que registran los ingresos generados por las ventas, el índice de satisfacción del cliente, que evalúa la satisfacción de los clientes con los productos o servicios, el costo de adquisición, que registra los gastos relacionados con la adquisición de productos o servicios, y el plazo de pago a proveedores, que mide el tiempo promedio que se tarda en pagar a los proveedores.

La representación de estos indicadores permite tener acceso rápido y en tiempo real a la información relevante. Para ello, la realidad virtual puede complementar la visualización de estos indicadores al proporcionar una representación gráfica y visualmente inmersiva de los datos. Por ejemplo, se pueden crear representaciones tridimensionales de los diferentes procesos, donde los indicadores se muestren como elementos visuales que representan el flujo de productos o la eficiencia de los procesos, lo que facilita la comprensión y el análisis de la información de manera más intuitiva y efectiva.

Capítulo 6. Integración de una función basada en monitorización de procesos para Smart Factory

	Indicadores	Fórmula	Descripción
Producción	Productividad	Unidades producidas / horas de trabajo	Mide la eficiencia en la producción
	Calidad de producción	Unidades defectuosas / total de unidades producidas	Mide la calidad de los productos producidos
	Tiempo de inactividad planificado	Tiempo de inactividad programado / tiempo total de producción	Mide el tiempo de inactividad planificado
	Tiempo de inactividad no planificado	Tiempo de inactividad no programado / tiempo total de producción	Mide el tiempo de inactividad no planificado
	Tiempo de ciclo	Tiempo total de producción / número de unidades producidas por proceso	Mide la velocidad de producción
	OEE (Eficiencia Global del Equipo)	Disponibilidad x Rendimiento x Calidad	Mide la eficiencia global de los equipos
	Tasa de rendimiento	Unidades producidas / capacidad máxima de producción	Mide la utilización de la capacidad
	Downtime	Tiempo de inactividad programado + tiempo de inactividad no programado	Mide el tiempo total de inactividad de la producción
Logística, almacenes y cadena de suministro	Tasa de cumplimiento del pedido	Pedidos entregados / Pedidos recibidos	Mide el porcentaje de pedidos entregados correctamente
	Costo de transporte	Costo de transporte / Pedidos entregados	Mide el costo promedio del transporte
	Rotación de inventario	Costo de los bienes vendidos / Promedio del inventario	Mide la velocidad de rotación del inventario
	Nivel de inventario	Valor total del inventario / Costo de los bienes vendidos	Mide el valor del inventario en relación con las ventas
	Tiempo de entrega	Fecha de entrega prometida - Fecha de entrega real	Mide la puntualidad en las entregas
	Índice de calidad del proveedor	Número de piezas defectuosas / Número total de piezas recibidas	Mide la calidad del proveedor
Compras y ventas	Ingresos totales	Cantidad total de ventas x Precio promedio de venta	Mide los ingresos totales de ventas
	Índice de satisfacción del cliente	Número de quejas / Número total de ventas	Mide la satisfacción del cliente
	Costo de adquisición	Costo total de los bienes adquiridos / Número total de bienes adquiridos	Mide el costo promedio de adquisición de bienes
	Plazo de pago a proveedores	Días promedio de plazo de pago a proveedores	Mide el tiempo de pago a los proveedores

TABLA 6.2: Indicadores de monitorización de procesos

6.3.1.3. Indicadores de monitorización de calidad

Para la monitorización de calidad en una *Smart Factory*, se presentan una serie de indicadores centrados en la calidad del producto. Estos indicadores se han dividido en tres categorías: productos, procesos y máquinas.

En la categoría de productos, se monitorean indicadores como la productividad, que mide la cantidad de productos o unidades producidas en un período de tiempo determinado, la calidad del producto, que evalúa el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos, y el scrap de producto, que registra la cantidad de productos defectuosos o no conformes.

En la categoría de procesos, se monitorean indicadores como la eficiencia del proceso, que evalúa la eficiencia y la optimización de los procesos de producción, el tiempo de inactividad planificado, que registra el tiempo programado en el que el proceso se detiene para tareas de mantenimiento o ajustes, y el tiempo de inactividad no planificado, que registra el tiempo en que el proceso se detiene de manera no planificada debido a averías o fallos.

En la categoría de máquinas, se monitorean indicadores como la disponibilidad de la máquina, que mide la proporción de tiempo en el que la máquina está disponible para su uso, el rendimiento de la máquina, que evalúa la capacidad de la máquina para

cumplir con los estándares de producción, y la calidad de la máquina, que evalúa el estado y la eficiencia de la máquina en función de los estándares establecidos.

La tabla 6.3 presenta estos indicadores de monitorización de calidad, los cuales se pueden mostrar en pantallas HMI con tamaños entre 7 y 29 pulgadas, así como en pantallas de computadoras, tablets y dispositivos móviles. Esto permite a los operadores y responsables del área de control tener acceso rápido y en tiempo real a la información relevante sobre la calidad.

Calidad	Indicadores	Fórmula	Descripción
Productos	Productividad	Unidades producidas / horas de trabajo	Mide la eficiencia en la producción de productos
	Calidad de producto	Unidades defectuosas / total de unidades producidas	Mide la calidad de los productos producidos
	Scrap de producto	Unidades rechazadas / total de unidades producidas	Mide la cantidad de productos rechazados
Procesos	Eficiencia del proceso	Tiempo de ciclo del proceso / tiempo de producción total	Mide la eficiencia del proceso
	Tiempo de inactividad planificado	Tiempo de inactividad programado / tiempo total de producción	Mide el tiempo de inactividad planificado
	Tiempo de inactividad no planificado	Tiempo de inactividad no programado / tiempo total de producción	Mide el tiempo de inactividad no planificado
Máquinas	Disponibilidad de la máquina	Tiempo de producción total - tiempo de inactividad / tiempo de producción total	Mide la disponibilidad de la máquina
	Rendimiento de la máquina	Tiempo de producción total / tiempo de ciclo de la máquina	Mide el rendimiento de la máquina
	Calidad de la máquina	Tiempo de producción total / tiempo total de la máquina	Mide la calidad de la máquina

TABLA 6.3: Indicadores de monitorización de calidad

6.3.1.4. Indicadores de monitorización de recursos

Los indicadores de recursos en una *Smart Factory*, según la Tabla 6.4, se han obtenido teniendo en cuenta los principales requerimientos de recursos que necesita la planta, como maquinaria, mano de obra, materiales y energía. Estos indicadores permiten monitorizar y evaluar el rendimiento y la eficiencia de los recursos utilizados en la producción.

En la categoría de maquinaria, se monitorean indicadores como el tiempo de actividad, que registra el tiempo total en el que la maquinaria está en funcionamiento, el tiempo de inactividad, que registra el tiempo en el que la maquinaria está detenida o fuera de servicio, y la eficiencia de la maquinaria, que evalúa la capacidad de la maquinaria para operar de manera eficiente y cumplir con los estándares de producción.

En la categoría de mano de obra, se monitorean indicadores como el tiempo productivo, que registra el tiempo en el que los trabajadores están involucrados en tareas productivas, el tiempo improductivo, que registra el tiempo en el que los trabajadores no están realizando tareas productivas, y la eficiencia de la mano de obra, que evalúa

la productividad y el rendimiento de los trabajadores en relación con los estándares establecidos.

En la categoría de materiales, se monitorean indicadores como el consumo de materiales, que registra la cantidad de materiales utilizados en la producción, el desperdicio de materiales, que registra la cantidad de materiales que se desperdician o se descartan durante el proceso, y el rendimiento de materiales, que evalúa la eficiencia en el uso de los materiales y la capacidad para minimizar el desperdicio.

En la categoría de energía, se monitorean indicadores como el consumo de energía eléctrica, que registra la cantidad de energía eléctrica utilizada en la producción, el consumo de combustible, que registra la cantidad de combustible utilizado, y la eficiencia energética, que evalúa la eficiencia en el uso de la energía y la capacidad para optimizar su consumo.

Estos indicadores se pueden mostrar en pantallas HMI con tamaños entre 7 y 29 pulgadas, así como en pantallas de computadoras, tablets y dispositivos móviles. Esto permite a los operadores y responsables del área de control tener acceso rápido y en tiempo real a la información relevante sobre los recursos utilizados en la planta.

Recurso	Indicadores	Descripción
Maquinaria	Tiempo de actividad	Tiempo total que las máquinas están en funcionamiento durante la jornada laboral
	Tiempo de inactividad	Tiempo total que las máquinas están detenidas durante la jornada laboral
	Eficiencia de la maquinaria	Porcentaje de tiempo en que la maquinaria está en funcionamiento respecto al tiempo total disponible
Mano de obra	Tiempo productivo	Tiempo total en que los operarios están realizando tareas productivas durante la jornada laboral
	Tiempo improductivo	Tiempo total en que los operarios están realizando tareas no productivas durante la jornada laboral (por ejemplo, descansos)
	Eficiencia de la mano de obra	Porcentaje de tiempo en que los operarios están realizando tareas productivas respecto al tiempo total disponible
Materiales	Consumo de materiales	Cantidad total de materiales utilizados durante la jornada laboral
	Desperdicio de materiales	Cantidad de materiales que se desperdician durante la jornada laboral
	Rendimiento de materiales	Porcentaje de materiales utilizados efectivamente respecto a la cantidad total utilizada
Energía	Consumo de energía eléctrica	Cantidad de energía eléctrica consumida durante la jornada laboral
	Consumo de combustible	Cantidad de combustible utilizado durante la jornada laboral
	Eficiencia energética	Relación entre la cantidad de energía utilizada y la cantidad de producción generada

TABLA 6.4: Indicadores de monitorización de recursos

6.3.2. Integración del sistema de monitorización

Los sistemas de monitorización estudiados, así como sus KPI, fueron diseñados y distribuidos de acuerdo con las áreas de la planta de la *Smart Factory* caso de estudio, de forma estratégica en el layout, como se muestra en la Figura 6.9. La distribución del sistema de monitorización se ha planificado realizar por tipo de monitorización en

las 3 áreas principales de la planta, que son: Área de almacén de materia prima, área de producción y área de producto terminado. La cantidad de monitores tenidos en cuenta para la distribución se ha realizado acorde al proceso productivo, donde se han instalado 20 monitores de diferentes tamaños distribuidos por tipo de monitorización según el área correspondiente de la siguiente manera: 7 para la monitorización de procesos, 11 para la monitorización de calidad y 5 para la monitorización de recursos. La distribución de los monitores permite un adecuado manejo y visualización para los usuarios.

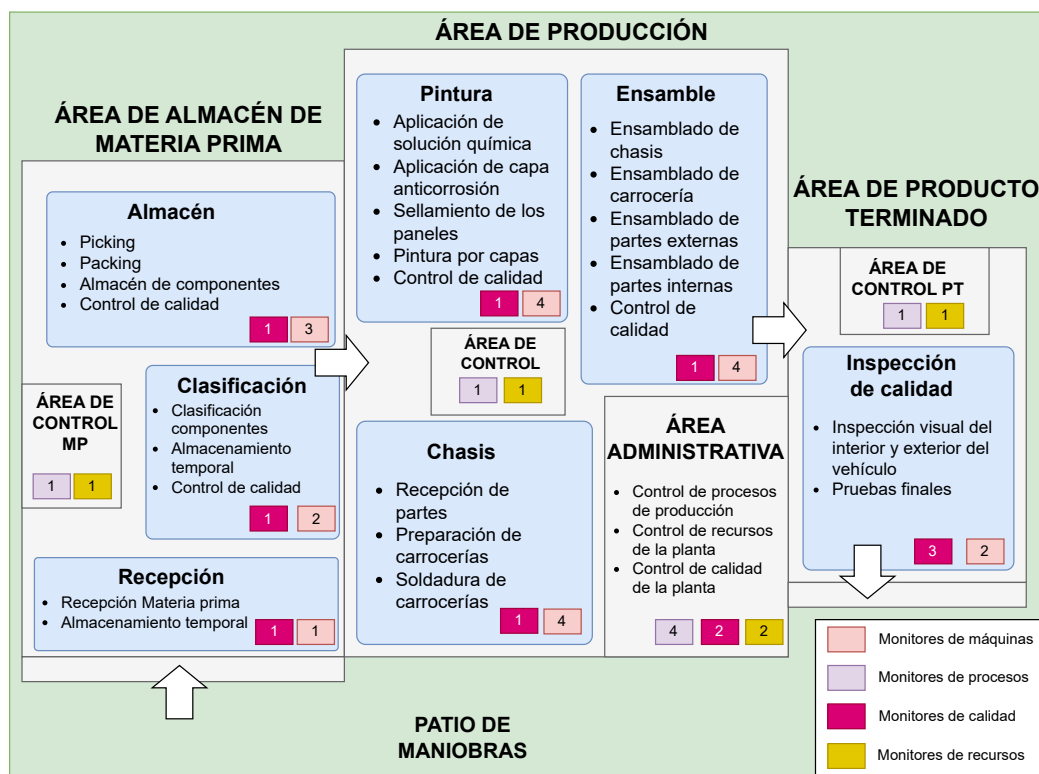


FIGURA 6.9: Distribución de los sistemas de monitorización en la planta de producción.

6.3.2.1. Construcción de bases de datos para monitorización

En la práctica, los datos en una planta de producción se recopilan a través de dispositivos como sensores durante el día, en cualquier momento en el que el sistema productivo esté funcionando, así como mediante registros de las entradas, proceso y salida de los productos. Sin embargo, para el caso de estudio de esta investigación, la recolección de datos se realizó a través de la simulación con el software Flexsim el cual por su gran potencial de simulación de procesos industriales permite simular diferentes tipos de procesos y obtener datos en tiempo real. El proceso de construcción de las bases de datos con Flexsim se puede consultar de forma detallada en el Apéndice E.

Dentro del aplicativo de realidad virtual se busca lograr un sistema de monitorización que aproveche la tecnología de realidad virtual para mejorar la visualización y

comprensión de los datos. En la Figura 6.10, se representa el proceso general de captura y análisis de datos para este sistema de monitorización con realidad virtual, utilizando diferentes software alternativos y plugins para monitorización de procesos con realidad virtual.

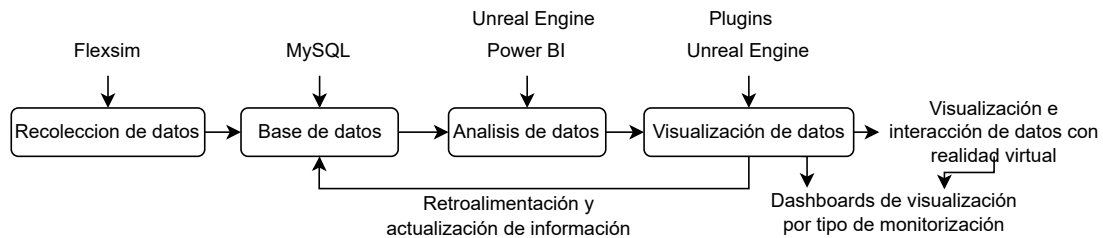


FIGURA 6.10: Proceso general de captura y análisis de datos para sistema de monitorización con realidad virtual

El proceso de recolección de datos que se utiliza para las bases de datos se ha realizado de la siguiente manera:

En primer lugar, se capturan los datos necesarios. Para ello, se han creado escenarios independientes de procesos específicos de la planta de producción de automóviles en el software FlexSim, de acuerdo con la Figura 6.9. A continuación, se realiza la vinculación de bases de datos entre el software FlexSim y un software de bases de datos, en este caso, se ha utilizado MySQL. En la Figura 6.11 se muestra el diseño de un proceso en FlexSim y la conexión de la base de datos MySQL para la captura de datos.

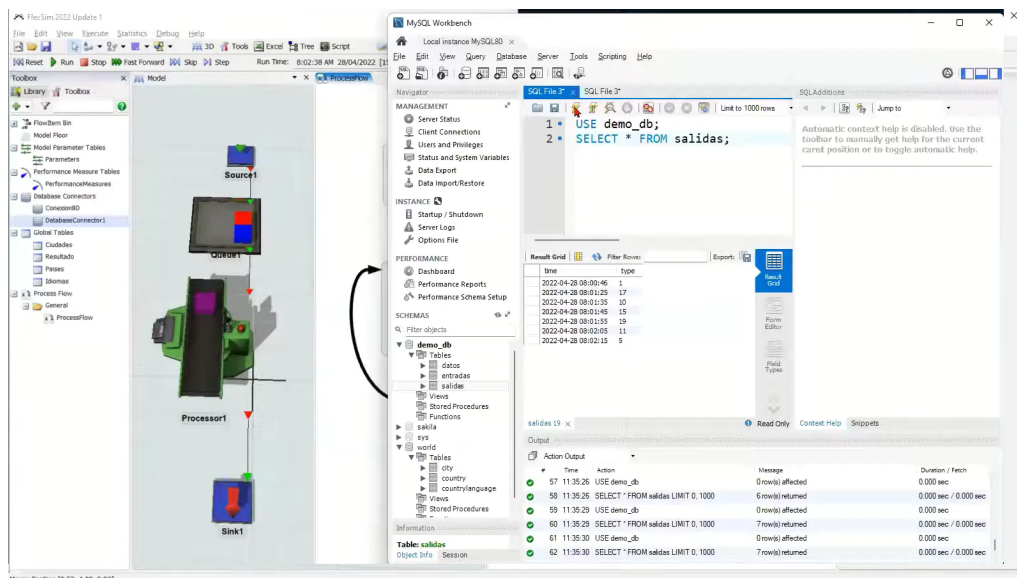


FIGURA 6.11: Vinculación de bases de datos entre el software FlexSim y MySQL.

Utilizando la simulación de FlexSim por escenarios, se crearon bases de datos en MySQL. Las bases de datos creadas se estructuraron en categorías correspondientes a los cuatro tipos de monitorización: monitorización de procesos, monitorización

de maquinaria, monitorización de calidad y monitorización de recursos. Estas bases de datos se diseñaron con el propósito de almacenar los datos relevantes para cada categoría, facilitando así el análisis y la visualización de los mismos.

En la Figura 6.12, se muestra un ejemplo visual de la organización de las bases de datos. Se pueden observar las distintas tablas que componen la base de datos, así como las relaciones entre ellas. Esta estructura proporciona una vista clara y estructurada de los datos, lo que facilita su análisis y la generación de informes interactivos en los software de Power BI y FlexSim. Las demás bases de datos construidas se pueden detallar en el Apéndice E.

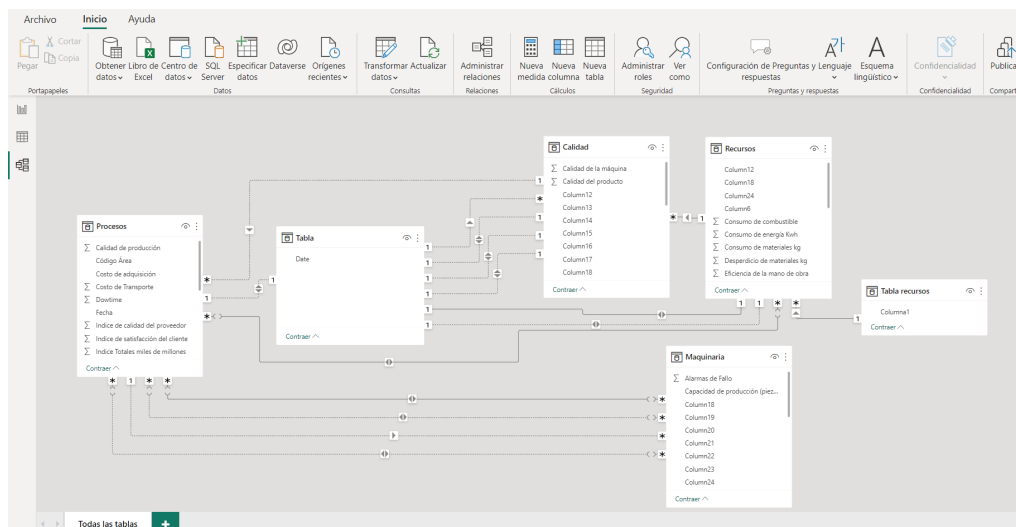


FIGURA 6.12: Construcción de bases de datos para monitorización en Power BI.

Una vez los datos se encuentran listos en la base de datos, se procede a vincularlos con el software de análisis de datos Power BI y Unreal Engine para realizar los dashboards acorde a las necesidades según el tipo de monitorización. Estas herramientas permiten realizar análisis detallados de los datos y generar representaciones visuales interactivas mediante dashboards para probarlos con realidad virtual.

En cuanto a la organización de la información entre los software utilizados, se ha procedido de la siguiente manera:

6.3.2.2. Construcción de dashboards en el software Power BI y Unreal Engine

Los dashboards son herramientas esenciales para visualizar y analizar datos de manera efectiva. En este estudio, se han construido dashboards tanto en Power BI como en Unreal Engine, aprovechando las capacidades de realidad virtual para una experiencia interactiva e inmersiva.

En Power BI, se han desarrollado diseños de dashboards teniendo en cuenta los cuatro tipos de monitorización y las bases de datos obtenidas. Estos dashboards proporcionan una visualización clara y concisa de los datos relevantes. La Figura 6.13

muestra un ejemplo de un diseño preliminar de un dashboard de monitorización en Power BI. La representación de los diseños de dashboard en su gran mayoría se han estructurado para contener paneles de control personalizados que presentan métricas clave, gráficos interactivos y tablas, permitiendo a los usuarios explorar y analizar los datos de manera intuitiva.

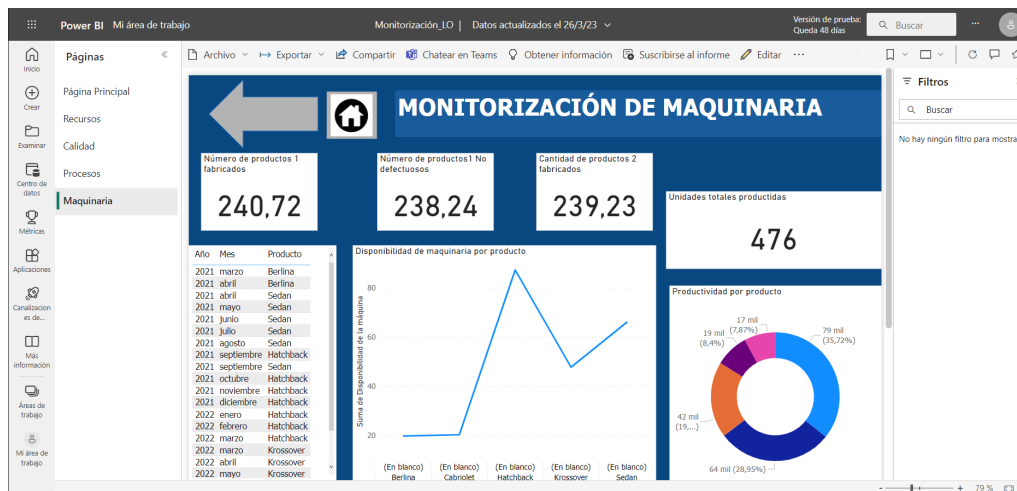


FIGURA 6.13: Construcción de bases de datos para monitorización en Power BI.

Por otro lado, se han diseñado dashboards directamente en Unreal Engine, utilizando *plugins* especializados de análisis de datos y los componentes de monitorización desarrollados en esta investigación. Estos dashboards aprovechan las capacidades de realidad virtual para proporcionar una experiencia inmersiva. Al utilizar la realidad virtual, los usuarios pueden interactuar directamente con los datos de monitorización. Pueden realizar acciones como encender o apagar máquinas, recalibrarlas o verificar la calidad de los productos, todo dentro del entorno virtual. Esto brinda una experiencia más realista y facilita la comprensión de los datos en un contexto tridimensional.

Una vez se construyeron los diseños de los dashboards acordes al proceso de producción de la planta, se procedió a implementarlos acorde a la distribución del sistema de monitorización en la planta de producción, como se muestra en la Figura 6.9 mediante programación en el software Unreal Engine para su funcionamiento alrededor de toda la planta de acuerdo a los 4 tipos de monitorización, en la Figura 6.14 se muestra algunos diseños de dashboards implementados en el proyecto. Los demás diseños de dashboards para sistemas de monitorización, su funcionamiento y aplicación en el aplicativo de realidad virtual se pueden consultar a más detalle en el apéndice D.

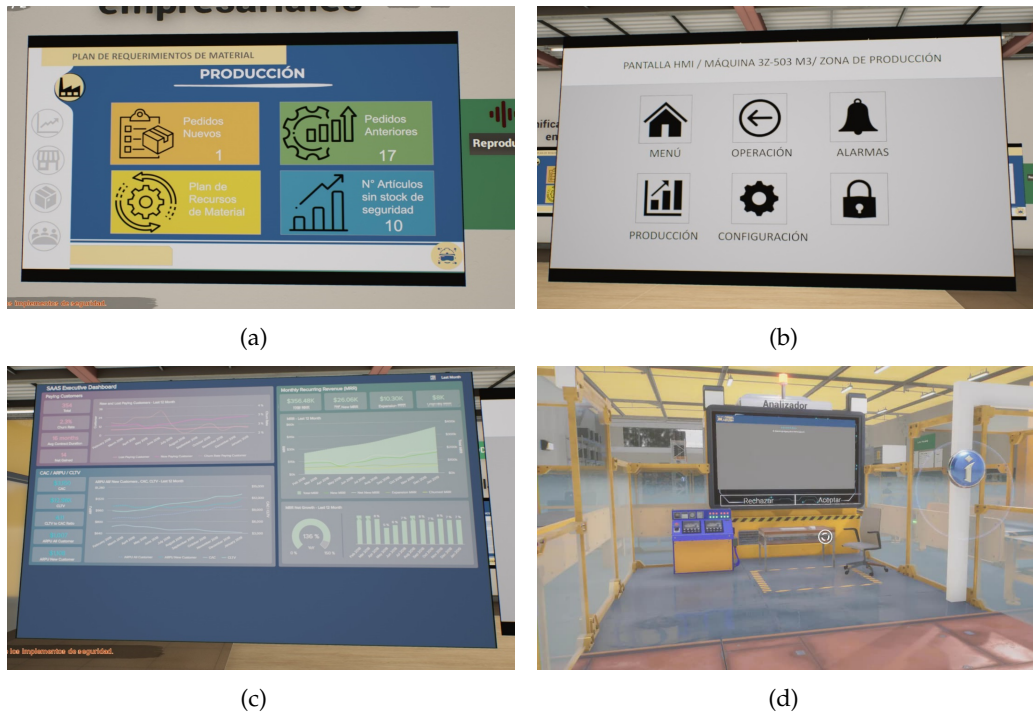


FIGURA 6.14: Montaje de los dashboards en monitores dentro del caso de estudio. (a) monitores en áreas de proceso, (b) monitores en máquinas, (c) monitores de recursos, (d) monitores de calidad.

6.4. Conclusiones

La monitorización de datos en entornos virtuales, especialmente en la *Smart Factory*, se ha convertido en una herramienta de importancia para la visualización y análisis de grandes volúmenes de información. La integración de sistemas, como MySQL, Flexsim, Power BI y Unreal Engine para realidad virtual, han permitido la representación de datos complejos de manera eficiente y comprensible para un solo sistema.

La utilización de la realidad virtual y el metaverso en la monitorización de datos en la *Smart Factory* ha abierto nuevas posibilidades en términos de colaboración y trabajo en equipo. Los usuarios pueden interactuar y compartir información en tiempo real dentro del metaverso, lo que promueve la colaboración, la toma de decisiones conjuntas y el intercambio de conocimientos. Además, la visualización inmersiva de los datos en entornos virtuales facilita una comprensión más profunda de los procesos y permite una identificación más precisa de áreas de mejora y optimización en la producción. La combinación de realidad virtual y metaverso potencia el potencial de la monitorización de datos en la *Smart Factory*, brindando una experiencia más completa y enriquecedora para los usuarios.

La implementación de la monitorización de datos en entornos virtuales, como la *Smart Factory*, ha demostrado ser un paso clave hacia la transformación digital de

la industria manufacturera. La combinación de tecnologías como la realidad virtual y la integración de sistemas de análisis de datos ha permitido una visualización más intuitiva y efectiva de la información, mejorando la toma de decisiones basada en datos y optimizando los procesos industriales. Además, la inclusión del metaverso como entorno colaborativo en tiempo real ha llevado la monitorización de datos a un nuevo nivel de interacción y colaboración entre los usuarios.

Evaluación de la propuesta

7.1. Motivación

En este capítulo, se presenta la evaluación del desarrollo del *framework* de realidad virtual en el contexto del Proyecto *Digital Factory Metaverse*. La evaluación se llevó a cabo mediante pruebas de usabilidad realizadas a participantes en distintas sesiones, utilizando equipos especializados de realidad virtual. Para validar los resultados, se empleó una metodología de pruebas de usabilidad que incluyó la definición de diferentes pruebas basadas en la experiencia de usuario, el diseño modular y la monitorización.

Entre los principales hallazgos obtenidos de las pruebas de usabilidad, destacan diversos aspectos clave. En primer lugar, se evidenció la destacada capacidad de colaboración y comunicación multiusuario, con un enfoque de metaverso, dentro de un entorno virtual en 3D. Este resultado resalta la efectividad del *framework* de realidad virtual en promover la interacción y el trabajo en equipo en un entorno inmersivo.

Además, se evaluó la funcionalidad y jugabilidad de la aplicación, lo que permitió identificar su desempeño y rendimiento en diferentes escenarios de uso. Los participantes experimentaron una experiencia fluida y satisfactoria al interactuar con el aplicativo, lo cual resalta la solidez de su diseño y desarrollo.

Asimismo, a través del análisis de las métricas obtenidas, se identificaron propuestas de mejora para optimizar aún más el *framework*. Estas sugerencias se basaron en los resultados cuantitativos y cualitativos recopilados durante las pruebas de usabilidad, lo que proporciona una base sólida para el perfeccionamiento continuo del sistema.

7.2. Diseño experimental

7.2.1. Participantes

En total, 15 participantes participaron para realizar las pruebas de usabilidad con el aplicativo de realidad virtual. Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de Realidad Virtual y Simulación de la carrera de Logística y Transporte de la Universidad

Politécnica Estatal del Carchi (UPEC)- Ecuador durante el periodo de enero a febrero de 2023.

Para realizar las pruebas de usabilidad, los participantes se dividieron en tres grupos: estudiantes, profesores y empresarios de la región que se dedican a actividades de manufactura en Tulcán, Ecuador. Estos grupos se formaron teniendo en cuenta la limitación de infraestructura y equipos de realidad virtual disponibles en el laboratorio. Se realizaron tres sesiones de dos horas por grupo durante el periodo de pruebas, con un máximo de cinco usuarios por grupo para garantizar una experiencia de usuario personalizada. La formación de los grupos se realizó únicamente con el propósito de trabajar de forma conjunta y colaborativa para el metaverso; los resultados finales no determinan distinción o pruebas comparativas entre los grupos.

Los grupos se formaron de la siguiente manera:

- Grupo 1 (estudiantes): 2 hombres y 3 mujeres (edad media: 22 años; desviación estándar: 1.5 años) sin problemas de salud física o visual.
- Grupo 2 (profesores): 4 hombres y 1 mujer (edad media: 37 años; desviación estándar: 3 años) sin problemas de salud física o visual.
- Grupo 3 (personal externo o de empresa): 3 hombres y 2 mujeres (edad media: 34 años; desviación estándar: 2 años) sin problemas de salud física o visual.

7.2.2. Equipamiento utilizado para las pruebas

El entorno de realidad virtual que se utilizó fue el laboratorio de Realidad Virtual y Simulación de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi en Ecuador. Se utilizaron un total de 5 equipos, que incluyeron:

- Visores de realidad virtual Meta Quest 2: Los visores Meta Quest 2 tienen un campo de visión medio de 90°. La pantalla incorporada es una IPS LCD con una resolución de 1832×1929 píxeles por ojo y una frecuencia de actualización máxima de 90 Hz. También cuentan con dos controladores táctiles que ofrecen 6 grados de libertad de movimiento. Estos controladores son rastreados por las cámaras frontales incorporadas en el visor.
- Ordenadores: Los ordenadores utilizados para las pruebas tenían las siguientes especificaciones: CPU AMD Ryzen 7-5800H, Octacore 5000 series y GPU Nvidia GeForce RTX3060 6GB. La memoria RAM de 16 GB DDR4-3200 MHz.

7.3. Procedimiento para realizar pruebas de usabilidad

Las pruebas de usabilidad se llevaron a cabo con el fin de validar el funcionamiento de la aplicación con los usuarios. Para ello, se siguió una metodología adaptada de [98], que consta de tres etapas, como se muestra en la Figura 7.1.

En la etapa de planificación, se definieron los objetivos de la prueba, se estableció el perfil de usuario, se seleccionó la ubicación adecuada, se preparó el equipo necesario y se establecieron las métricas de evaluación.

Durante la etapa de desarrollo de la prueba, se realizaron las actividades de preparación, como la configuración de los recursos y la preparación del entorno. Luego se llevó a cabo la ejecución de la prueba, permitiendo a los participantes interactuar con la aplicación y realizar las tareas asignadas.

En la etapa de resultados de las pruebas, se analizó la experiencia del usuario según las métricas establecidas. Se recopilaron datos relevantes, se realizaron evaluaciones cualitativas y cuantitativas, y se obtuvieron conclusiones sobre la usabilidad de la aplicación. Además, se identificaron posibles áreas de mejora y se propusieron estrategias para optimizar la experiencia del usuario.

Este procedimiento garantizó un enfoque sistemático y completo para evaluar la usabilidad de la aplicación, brindando información valiosa para su mejora continua.

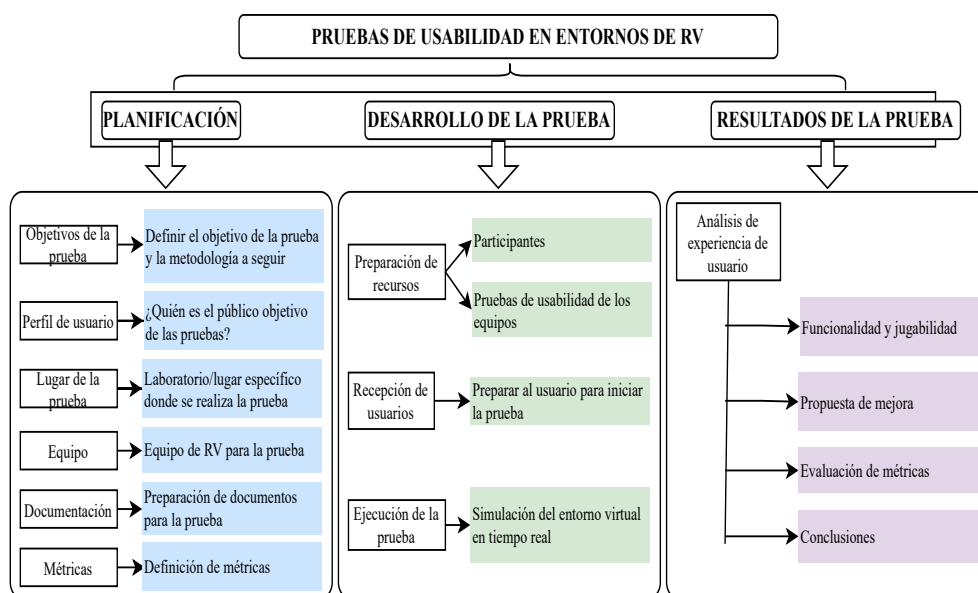


FIGURA 7.1: Metodología de pruebas de usabilidad.

De acuerdo con la metodología descrita en la Figura 7.1, se recopilaron datos reales a lo largo de todas las etapas de la metodología de pruebas de usabilidad, desde la planificación hasta los resultados de las pruebas. Los datos obtenidos se resumen en la Tabla 7.1, que proporciona una visión general del esquema de datos recopilados. Esta tabla incluye información relevante como los objetivos de la prueba, el perfil de usuario, la ubicación, el equipo utilizado, las métricas de evaluación y los resultados obtenidos. Los datos recopilados en cada etapa son fundamentales para comprender la experiencia del usuario y tomar decisiones informadas sobre posibles mejoras en la aplicación.

Planificación		Desarrollo de la prueba		Resultados de la prueba	
Objetivos de la prueba	Realización de pruebas de colaboración simultánea en línea para una planta de producción con smart factory	Preparación de recursos	Participantes: acompañamiento y formación previos para cada usuario. Los participantes fueron divididos en 3 grupos para participar en 3 sesiones de aproximadamente 2 h de duración		Funcionalidad y jugabilidad
Perfil de usuario	Un total de 15 usuarios (estudiantes, profesores y personal de empresa)		Equipamiento: se dispuso de laboratorio especializado en RV para realizar las pruebas con un completo kit de equipamiento, un total de 6 equipos.		Propuesta de mejora
Ajustes de la prueba	Laboratorio de RV y lugares de residencia de los usuarios	Recepción de usuarios	Los usuarios fueron entrenados en grupo en el uso de controles, en modo multiusuario y en la experiencia de RV antes de la prueba	Análisis de la experiencia de usuario	Evaluación de métricas
Equipo	Equipos de RV especializados Oculus Quest 2.				
Documentación	Guías de prácticas y manejo de controles	Pruebas	Cada usuario tenía un dispositivo de RV conectado a Internet, y la aplicación se ejecutaba a través de una sesión creada por el tutor principal. Cada usuario dentro de los grupos experimentó una inmersión en tiempo real en el mundo virtual para trabajar en tareas de equipo		Conclusiones
Métricas	Métricas de usabilidad definidas				

TABLA 7.1: Aplicación de la metodología de usabilidad.

7.4. Resultados de las pruebas de usabilidad

Se llevaron a cabo pruebas de usabilidad con los participantes con el objetivo de evaluar la experiencia del usuario y el uso de la aplicación de capacitación y entrenamiento. El propósito de estas pruebas fue identificar posibles problemas que pudieran surgir durante la realización de las actividades propuestas, así como proponer mejoras y soluciones.

Durante las pruebas, se recopilaron datos y se realizaron evaluaciones para obtener información detallada sobre la experiencia de los usuarios. Se analizó cómo interactuaban con la aplicación, qué dificultades encontraban, qué aspectos les resultaban más intuitivos y qué sugerencias tenían para mejorar la usabilidad.

7.4.1. Guías de prácticas de laboratorio para el aplicativo de realidad virtual

El diseño y desarrollo de guías de laboratorio para el aplicativo de realidad virtual es un componente esencial del proceso de implementación de esta innovadora herramienta. Estas guías tienen como objetivo proporcionar a los usuarios una experiencia estructurada y enriquecedora al utilizar el aplicativo, asegurando que puedan aprovechar al máximo las prácticas y actividades disponibles en la plataforma Virprot.

7.4.1.1. Utilidad de las Guías

Las guías de laboratorio que he desarrollado tienen una gran utilidad en el proceso de aprendizaje y práctica de los usuarios en el aplicativo de realidad virtual. Su papel es fundamental en este sentido:

1. **Orientación y Organización:** Estas guías proporcionan una clara orientación sobre la secuencia de actividades que los usuarios deben seguir al realizar las prácticas en el aplicativo. Esto asegura que los usuarios sepan exactamente qué pasos deben seguir y en qué orden llevar a cabo las acciones.
2. **Objetivos Claros:** Cada guía de laboratorio presenta de manera precisa los objetivos específicos que los usuarios deben alcanzar al realizar las prácticas. De esta manera, los usuarios comprenden el propósito de cada actividad y cómo se relaciona con las habilidades que se espera que adquieran.
3. **Apoyo en el Aprendizaje Teórico:** Las guías han sido diseñadas de forma tal que fomentan la comprensión teórica previa antes de que los usuarios inicien las prácticas. Esto garantiza que los usuarios tengan una base sólida de conocimientos teóricos antes de aplicarlos en el entorno de realidad virtual.
4. **Claridad en el Proceso de Desarrollo:** Cada guía describe el proceso paso a paso para llevar a cabo la práctica en el aplicativo de realidad virtual. Esto ayuda a los usuarios a seguir una secuencia lógica y coherente para alcanzar los resultados deseados.

7.4.1.2. Presentación de las Guías

Las guías de laboratorio desarrolladas se encuentran disponibles para consulta en el Apéndice F de este documento. Se han creado diez guías, cada una enfocada en una práctica específica del aplicativo de realidad virtual agrupadas por categorías de producción, logística, almacenamiento, diseño modular, monitorización y *Smart Factory*.

Las guías de laboratorio se presentan a los usuarios a través de la plataforma Virprot, donde tienen acceso a toda la información necesaria para realizar las prácticas de manera efectiva. Antes de acceder a las guías de prácticas, los usuarios deben completar ciertos requisitos previos, que incluyen:

1. **Estudio Teórico:** Antes de iniciar cualquier práctica, los usuarios deben estudiar la teoría relacionada con el tema en cuestión. Esto puede incluir lecturas, presentaciones de diapositivas o recursos adicionales proporcionados en la plataforma.
2. **Clases Teóricas:** Se recomienda que los usuarios asistan a clases teóricas o sesiones de capacitación que complementen el estudio individual. Estas clases pueden ser presenciales o en línea y servirán para aclarar dudas y proporcionar una explicación más detallada de los conceptos relevantes.
3. **Preparación Previa:** Los usuarios deben asegurarse de estar familiarizados con el funcionamiento básico del aplicativo de realidad virtual antes de iniciar las prácticas. Esto puede incluir ejercicios introductorios o tutoriales para familiarizarse

con los controles y la navegación en el entorno virtual.

Una vez que los usuarios han cumplido con los requisitos previos, pueden acceder a las guías de laboratorio que se encuentran en el apéndice. Cada guía está estructurada de la siguiente manera:

1. **Información General de la Práctica:** Se proporciona una descripción general de la práctica, incluyendo el contexto y los conceptos clave involucrados.
2. **Objetivo de la Práctica:** Se establecen los objetivos específicos que los usuarios deben lograr al completar la práctica.
3. **Proceso de Desarrollo de la Práctica:** Se detalla el paso a paso para llevar a cabo la práctica en el aplicativo de realidad virtual. Esto incluye las acciones que deben realizar, las herramientas disponibles y cualquier recomendación relevante.
4. **Marco Teórico de la Práctica:** Se presenta una breve revisión de los conceptos teóricos relacionados con la práctica en cuestión. Esto refuerza la conexión entre la teoría y la aplicación práctica.

7.4.2. Definición de métricas para pruebas de usabilidad

En esta investigación, se propuso una evaluación del sistema de realidad virtual mediante el uso de seis categorías de métricas para las pruebas de usabilidad, tales como: Experiencia del usuario, preparación y control de dispositivos, multiusuario, efectos de inmersión, diseño modular y monitorización.

Estas categorías de métricas fueron propuestas como resultado de la investigación realizada en el contexto de la tesis. La selección y definición de estas categorías se basaron en la revisión de literatura, así como en el análisis de las necesidades y requerimientos específicos del sistema de realidad virtual en estudio, como es el caso del diseño modular y la monitorización. Con el objetivo de evaluar de manera integral la experiencia del usuario y el desempeño del sistema, se identificaron estos aspectos clave y se establecieron métricas correspondientes a cada categoría.

A continuación, se detallan las categorías:

- **Experiencia del usuario:** Esta categoría se centra en evaluar la calidad de la experiencia del usuario al interactuar con el sistema de realidad virtual. Se consideran aspectos como la facilidad de uso, la satisfacción percibida, la sensación de inmersión y la comodidad durante la interacción. Para medir estos aspectos, se pueden utilizar técnicas como encuestas de satisfacción, escalas de usabilidad y registros de tiempo y errores durante las tareas.
- **Preparación y control de dispositivos:** En esta categoría, se evalúa la facilidad y eficacia con la que los usuarios pueden configurar y controlar los dispositivos de realidad virtual necesarios para utilizar el sistema. Se pueden medir métricas como el tiempo requerido para la configuración inicial, la facilidad de ajuste de los controladores y sensores, y la precisión del seguimiento de movimiento.
- **Multiusuario:** Esta categoría se enfoca en evaluar la capacidad del sistema para permitir la colaboración y comunicación entre múltiples usuarios en un entorno

virtual compartido. Se pueden medir métricas como la sincronización entre usuarios, la facilidad de interacción entre ellos y la facilidad de compartir contenido o recursos en el entorno virtual.

- **Efectos de inmersión:** Aquí se examinan los elementos que contribuyen a la sensación de inmersión en el entorno virtual. Las métricas incluyen la calidad visual del entorno virtual, la respuesta y precisión del seguimiento de movimiento, la calidad del sonido y la retroalimentación háptica. Se pueden utilizar escalas de inmersión y evaluaciones subjetivas para medir estos aspectos.
- **Diseño modular:** En esta categoría, se evalúa la estructura modular del sistema de realidad virtual, que permite la integración de diferentes componentes y la flexibilidad en la configuración. Las métricas pueden incluir la facilidad de agregar o personalizar módulos, la compatibilidad con componentes externos y la flexibilidad en la configuración según las necesidades específicas del usuario.
- **Monitorización:** Se considera la capacidad del sistema para recopilar datos y métricas relevantes durante las pruebas de usabilidad. Se pueden medir métricas como el rendimiento del sistema, la detección de errores, la eficacia de los registros y la generación de informes para el análisis posterior.

En la Tabla 7.2 se encuentran detalladas las categorías y las métricas utilizadas en cada una de ellas.

Experiencia de usuario	
Aprendizaje	Evalúa la rapidez con la que el usuario aprende a manejar el dispositivo y cómo se puede mejorar este proceso.
Ayuda	Evaluar cuándo el usuario requiere ayuda para manejar el dispositivo y cuál es la forma más eficaz de transmitírsela sin influir en sus acciones.
Evaluación de la funcionalidad de la aplicación	Se llevará a cabo una evaluación de la funcionalidad de la aplicación, centrándonos en su interactividad, la calidad de los recorridos, la utilización de multimedia y las simulaciones de objetos.
Mundos virtuales 3D con realidad virtual vs. otras tecnologías	Experiencia de usuario con diferentes tecnologías de simulación 3D, incluyendo mundos virtuales 3D con realidad virtual y otras tecnologías.
Visualización de gráficos 2D y 3D en la aplicación	Se analizará la experiencia del usuario y su percepción subjetiva en cuanto a la calidad de los gráficos.
Navegación e interacción	Dado que la RV aún es nueva para la mayoría de los usuarios, se evaluará la experiencia del usuario con la aplicación.
Contenidos desarrollados para <i>Smart Factory</i>	La experiencia de inmersión del usuario en el escenario del mundo virtual se evaluará de acuerdo con la realidad.
Preparación y Control de Dispositivos	
Lugar de la prueba	Laboratorio o domicilio del usuario.

Capítulo 7. Evaluación de la propuesta

Errores críticos	Relacionados con la planificación, el equipo de RV, el espacio y la logística del personal
Manejo de los controles	Se valora el aprendizaje y uso adecuado de los controles para las diferentes funciones de la aplicación.
Utilización de equipos de realidad virtual	Se evaluará la comodidad, el manejo y los fotogramas por segundo de todos los equipos de realidad virtual.
Multiusuario	
Comunicación	Se buscará determinar cuál es el medio de comunicación más efectivo dentro y fuera de la aplicación, analizando su eficacia en términos de interacción entre los usuarios.
Colaboración en equipo	Se evaluará la colaboración eficaz para realizar tareas en equipo
Conectividad multiusuario	Conectividad estable a Internet para reproducción multimedia y conexión multiusuario en línea.
Avatares	Percepción del usuario del avatar dentro del mundo virtual
Efectos de inmersión	
Malestar general	El participante presenta malestar general del cuerpo durante y después de la prueba.
Sensación de vértigo	Este efecto puede ser causado por los movimientos de luz y alturas simulados en la aplicación, y puede afectar negativamente la experiencia del usuario.
Sudoración	El participante presenta sudoración en la frente, las manos y otras partes del cuerpo durante la prueba.
Náuseas	Se evaluará la incidencia de la sensación de náuseas experimentada por los usuarios, con el fin de detectar posibles efectos secundarios.
Fatiga	Esta evaluación permitirá identificar posibles problemas ergonómicos que puedan afectar la experiencia del usuario en la aplicación de realidad virtual.
Malestar estomacal	Es importante evaluar y medir esta posible incomodidad para mejorar la experiencia del usuario y evitar problemas de salud.
Capacidad de concentración	Se prestará atención a su capacidad para mantener el enfoque en la tarea asignada y evitar distracciones.
Visión borrosa	Durante la prueba, los participantes pueden experimentar problemas de visión, específicamente visión borrosa, lo que dificulta su capacidad para visualizar adecuadamente los gráficos en las lentes del dispositivo de realidad virtual.
Diseño modular	
Comprensión del diseño modular	Evalúa la comprensión general de los usuarios sobre los conceptos de diseño modular y su importancia en una <i>Smart Factory</i> o planta de producción.

Identificación de los componentes modulares	Mide la capacidad de los usuarios para identificar los componentes modulares en una instalación industrial y comprender cómo se pueden reorganizar y combinar para diferentes configuraciones.
Diseño de una instalación modular	Evalúa la capacidad de los usuarios para diseñar una instalación modular utilizando diferentes componentes y configuraciones.
Evaluación de la modularidad de una instalación	mide la capacidad de los usuarios para evaluar la modularidad de una instalación existente y proponer mejoras en su diseño para aumentar la modularidad.
Monitorización	
Nivel de comprensión de los datos	Mide la capacidad de los usuarios para comprender y analizar los datos de monitoreo en tiempo real y los datos históricos.
Interacción del usuario con los monitores	Mide la facilidad y eficiencia con la que los usuarios interactúan con el sistema de monitoreo.
Precisión de la identificación de problemas	Mide la precisión con la que los usuarios pueden identificar y diagnosticar problemas en los procesos industriales utilizando el sistema de monitorización.
Tasa de errores de usuario	mide la frecuencia y el tipo de errores que cometen los usuarios al utilizar el aplicativo de realidad virtual y monitorear los procesos industriales.
Evaluación de la monitorización en <i>Smart Factory</i>	Mide la capacidad de los usuarios para evaluar la monitorización de una instalación existente y proponer mejoras en sus sistemas de monitorización en <i>Smart Factory</i> .

TABLA 7.2: Definición de métricas para experiencia de usuario con realidad virtual.

7.4.3. Análisis de las métricas

Se realizó un análisis detallado de cada una de las métricas, tal como se muestra en la Tabla 7.2. Este análisis se llevó a cabo utilizando un cuestionario en línea disponible en el siguiente enlace: <https://forms.gle/MJNCa1CjfceJACiD7> (consulte el Apéndice B para más detalle). El diseño del cuestionario se centró en evaluar aspectos conceptuales, cualitativos, descriptivos y exploratorios, más que en parámetros estadísticos, analíticos o correlacionales.

El sistema de realidad virtual fue probado exitosamente con los tres grupos de usuarios que participaron para pruebas de usabilidad de la aplicación. La Figura 7.2 muestra algunos de los participantes utilizando la aplicación en condiciones similares.



FIGURA 7.2: Pruebas de usabilidad del aplicativo de realidad virtual con participantes.

A continuación, se muestran los resultados más relevantes obtenidos a partir de las seis categorías de estudio. Estas categorías proporcionaron una base sólida para evaluar la usabilidad del sistema de realidad virtual y obtener información detallada sobre la experiencia del usuario.

■ **Experiencia del usuario**

Se observó que los participantes en los tres grupos tuvieron un tiempo de aprendizaje promedio de alrededor de 20 minutos, con una tasa de éxito en completar tareas del 85 % en el grupo de estudiantes, 80 % en el grupo de profesores y 80 % en el grupo de empresarios. En cuanto a la necesidad de ayuda, aproximadamente el 70 % de los participantes en cada grupo solicitó ayuda en algún momento, y en promedio, el 90 % de ellos se mostró satisfecho con la asistencia recibida.

En la evaluación de la funcionalidad de la aplicación, se obtuvieron puntuaciones promedio de 9 en una escala del 1 al 10 en los grupos de estudiantes y profesores, mientras que el grupo de empresarios obtuvo una puntuación promedio ligeramente inferior, alrededor de 8.8. Esto indica un nivel general de satisfacción con la interactividad, calidad de los recorridos, utilización de multimedia y simulaciones de objetos en la aplicación.

En términos de preferencia por la realidad virtual en comparación con otras tecnologías, el grupo de estudiantes mostró un mayor porcentaje de preferencia 95 %, seguido del grupo de empresarios 92 % y el grupo de profesores 90 %. En cuanto a la calidad de los gráficos visualizados, los participantes en los tres grupos dieron una calificación promedio de 9.8 en una escala del 1 al 10.

En relación con la navegación e interacción en la aplicación, alrededor del 90 % de los participantes en cada grupo se sintió cómodo con la experiencia. Además, la experiencia de inmersión en los contenidos desarrollados para la *Smart Factory* recibió una alta puntuación promedio de aproximadamente 9.8 en una escala del 1 al 10 en todos los grupos.

Estos resultados muestran niveles satisfactorios en la experiencia de usuario en

términos de aprendizaje, necesidad de ayuda, funcionalidad, preferencia por la realidad virtual, calidad gráfica, navegación e inmersión en los tres grupos de participantes. Estos hallazgos proporcionan una base para mejorar la usabilidad y optimizar la experiencia del usuario en futuras iteraciones de la aplicación de realidad virtual, considerando las necesidades y características específicas de cada grupo.

■ **Preparación y control de dispositivos**

La segunda métrica de preparación y control de los dispositivos e inicio de la aplicación, se analizó que los usuarios con experiencia previa en el uso de dispositivos de realidad virtual necesitaron menos tiempo de preparación y aprendizaje en comparación con los nuevos usuarios. La adaptación de estos últimos fue posible en varias sesiones con la aplicación de realidad virtual. El dato más interesante obtenido fue que el 90 % de los hombres y el 80 % de las mujeres se adaptaron rápidamente al uso y manipulación de los dispositivos. Aunque para los nuevos usuarios, el aprendizaje inicial llevó más tiempo, en la segunda vez que los utilizaron, todo fue más rápido y sin complicaciones. En cuanto a los indicadores de usabilidad, se encontraron algunos errores críticos en un porcentaje reducido de casos. Estos errores estuvieron relacionados con problemas de planificación, la falta de espacio adecuado y errores logísticos del personal. Sin embargo, en general, la mayoría de los participantes lograron aprender y utilizar correctamente los controles de la aplicación.

En términos de la utilización de equipos de realidad virtual, los participantes reportaron altos niveles de comodidad, con un 88 % de satisfacción. Asimismo, demostraron habilidades adecuadas en el manejo de los equipos, con un porcentaje del 95 %. En cuanto al rendimiento de los equipos en términos de fotogramas por segundo, el 90 % de los participantes encontraron el rendimiento satisfactorio.

■ **Multiusuario**

En cuanto a la comunicación, se encontró que la comunicación por voz fue el medio más efectivo en el metaverso, preferido por el 100 % de los participantes en todos los grupos.

En términos de colaboración en equipo, el 90 % de los participantes en cada grupo reportó haber realizado una colaboración efectiva en el metaverso para las actividades realizadas. Esto destaca la capacidad del entorno virtual para fomentar la colaboración y el trabajo en equipo, lo cual es fundamental para la realización de tareas conjuntas.

En cuanto a la conectividad multiusuario, se observó que el 100 % de los participantes en cada grupo experimentó una conexión estable a Internet durante las sesiones en el metaverso.

Con relación a los avatares, se encontró que el 80 % de los participantes en todos los grupos se identificó adecuadamente con el avatar estándar que se presenta en el aplicativo. Todos los participantes destacaron la alta sensación de realismo que

la modalidad ofrecía para las prácticas en grupo en el metaverso.

■ **Efectos de inmersión**

Las métricas definidas para los efectos de inmersión se realizaron tomando como referencia algunos de los ítems del Cuestionario de Malestar en Realidad Virtual (RVSQ) presentado en [99]. En particular, dado que nuestro estudio se centra en la propuesta de un *framework* de sistemas de realidad virtual para un metaverso experimental, se consideraron los ítems más aproximados de la evaluación general del cuestionario propuesto en esta investigación, que incluían malestar general, mareos, sudoración, náuseas, fatiga, sensibilización estomacal, dificultad de enfoque y visión borrosa.

Durante la evaluación del aplicativo de realidad virtual, se analizaron diversos indicadores y métricas comparativas de estadística para evaluar el efecto de inmersión en los participantes. Los resultados revelaron que algunos participantes experimentaron efectos adversos, como malestar general 10 %, sensación de vértigo 25 %, sudoración 25 %, náuseas 5 %, fatiga 10 %, malestar estomacal 5 % y visión borrosa 10 %. Estos efectos se consideraron normales, ya que no causaron daños a los participantes.

Sin embargo, es importante destacar que la mayoría de los participantes demostró una buena capacidad de concentración 85 % en la tarea asignada. Esto indica un nivel de compromiso y atención por parte de los usuarios durante la utilización del aplicativo.

Estos hallazgos para la métrica proporcionan una visión clara de los efectos de inmersión experimentados por todos los participantes en el aplicativo de realidad virtual. Estos resultados son fundamentales para identificar áreas de mejora y optimizar la experiencia del usuario, a fin de garantizar una experiencia más cómoda y satisfactoria en la realidad virtual.

■ **Diseño modular**

Con relación a la comprensión del diseño modular, se observó que aproximadamente el 90 % de los usuarios tiene una comprensión general de los conceptos de diseño modular y su importancia en una *Smart Factory* o planta de producción.

En cuanto a la identificación de los componentes modulares, alrededor del 85 % de los usuarios muestra capacidad para identificar los componentes modulares en una instalación industrial. Estos usuarios también comprenden cómo se pueden reorganizar y combinar dichos componentes para crear diferentes configuraciones.

En lo que se refiere al diseño de una instalación modular, se encontró que cerca del 80 % de los usuarios tiene la capacidad para diseñar una instalación modular utilizando diversos componentes y configuraciones. Esto implica que estos usuarios pueden crear una estructura modular adaptable a diferentes necesidades.

En términos de la evaluación de la modularidad de una instalación existente, se observó que alrededor del 75 % de los usuarios puede evaluar la modularidad

de una instalación y proponer mejoras en su diseño para incrementar dicha modularidad. Esto sugiere que estos usuarios son capaces de identificar áreas de mejora en una instalación y proponer cambios que la hagan más modular y flexible.

Estos resultados muestran que, en general, existe un nivel aceptable de comprensión y habilidades relacionadas con el diseño modular entre los usuarios evaluados. Sin embargo, se puede trabajar en mejorar la capacidad de identificación de componentes, diseño de instalaciones modulares y evaluación de la modularidad.

■ **Monitorización**

En relación con el nivel de comprensión de los datos, se observó que aproximadamente el 75 % de los usuarios tiene la capacidad de comprender y analizar los datos de monitoreo en tiempo real y los datos históricos. Esto indica que la mayoría de los usuarios posee las habilidades necesarias para interpretar la información proporcionada por el sistema de monitorización.

En cuanto a la interacción del usuario con los monitores, alrededor del 80 % de los usuarios muestra facilidad y eficiencia al interactuar con el sistema de monitoreo. Esto implica que la interfaz y la usabilidad del sistema son adecuadas, lo que permite a los usuarios interactuar de manera fluida y sin dificultades.

En lo que se refiere a la precisión de la identificación de problemas, se encontró que cerca del 65 % de los usuarios tiene la capacidad de identificar y diagnosticar problemas en los procesos industriales utilizando el sistema de monitorización con precisión. Esto sugiere que estos usuarios son capaces de detectar y resolver problemas de manera efectiva.

En términos de la tasa de errores de usuario, se observó que se producen errores en aproximadamente el 10 % de los casos al utilizar el aplicativo de realidad virtual y monitorear los procesos industriales. Estos errores suelen estar relacionados con errores de entrada de datos y selección incorrecta de parámetros. Es importante tener en cuenta estos errores para mejorar la usabilidad y reducir la probabilidad de equivocaciones por parte de los usuarios.

Sobre la evaluación de la monitorización en *Smart Factory*, se encontró que alrededor del 60 % de los usuarios es capaz de evaluar la monitorización de una instalación existente y proponer mejoras en sus sistemas de monitorización. Esto indica que estos usuarios tienen la capacidad de identificar áreas de mejora y proponer soluciones para optimizar los sistemas de monitorización en una *Smart Factory*.

Estos resultados proporcionan una visión general de la capacidad de los usuarios para comprender, interactuar y utilizar eficientemente el sistema de monitorización en una *Smart Factory*. Si bien la mayoría de los usuarios muestra habilidades adecuadas en estos aspectos, se pueden realizar mejoras para aumentar la precisión en la identificación de problemas y reducir la tasa de errores de usuario.

7.4.4. Propuestas de mejora

En un análisis posterior de todos los participantes reunidos en grupo, se realizaron propuestas de mejora, para lo cual se definieron siete propuestas que se pueden concluir como de alto nivel tras las pruebas de usabilidad con los participantes:

- P1—En comparación con la tecnología virtual tradicional, los usuarios de grupos de trabajo que utilizan realidad virtual en el mundo virtual pueden experimentar un mayor nivel de (a) presencia, (b) realismo y (c) interactividad.
- P2—Tras la utilización de la tecnología de realidad virtual, los usuarios experimentan un aumento significativo en su nivel de presencia social y control sobre su autoexpresión a través de la manipulación de sus avatares.
- P3— Los usuarios que se sumergen en el mundo virtual exhiben un nivel superior de procesamiento de la información en comparación con aquellos que no han tenido acceso a esta tecnología.
- P4—Los usuarios del mundo virtual disfrutaban de un nivel elevado de soporte de comunicación durante los eventos que tienen lugar en este entorno.
- P5—El entorno virtual de realidad virtual desarrollado con el motor gráfico Unreal Engine muestra un alto nivel de realismo en comparación con los escenarios virtuales tradicionales.
- P6— El entorno virtual desarrollado posee la capacidad de funcionar como un metaverso a pequeña escala. La mayoría de los usuarios experimentaron un entrenamiento casi realista y una eficiencia de entrenamiento en comparación con un entorno real.
- P7—La tecnología de realidad virtual pueden ofrecer beneficios a las instituciones y empresas en cuanto a reducción de costos relacionados con logística y los sistemas de producción.

Aunque la mayoría de las pruebas realizadas arrojaron resultados satisfactorios para los usuarios, es importante destacar algunas propuestas de mejora para una nueva versión de la aplicación de realidad virtual:

- P1—La utilización de dispositivos de realidad virtual resulta crítica en términos de experiencia de usuario. Durante las pruebas, se observó que los usuarios que utilizaron los cascos Oculus Quest 2 experimentaron algunas sensaciones de mareo y cansancio después de una hora de uso.
- P2—Mejorar la interfaz de usuario y la experiencia de aprendizaje en el aplicativo de realidad virtual para reducir el tiempo de adaptación y aumentar la tasa de éxito en completar tareas. Esto incluye proporcionar tutoriales interactivos y guías visuales para facilitar la comprensión de las funcionalidades.
- P3—Incrementar las opciones de personalización de los avatares para mejorar la identificación y autoexpresión de los usuarios, permitiéndoles ajustar aspectos como apariencia, vestimenta y accesorios.
- P4—Optimizar la presentación de información en tiempo real y la capacidad de interacción con los datos para mejorar el procesamiento de información por parte

de los usuarios, incluyendo visualizaciones claras y herramientas intuitivas de análisis de datos.

- P5—La navegación e interacción con el contenido presentó algunas dificultades durante el primer uso, especialmente para aquellos usuarios nuevos en el mundo de la realidad virtual. Los controles e interacciones dentro de la aplicación resultaron complicados de manejar al principio. No obstante, aquellos usuarios con experiencia previa en realidad virtual o videojuegos aprendieron rápidamente y mostraron un alto grado de satisfacción durante las pruebas. Se espera que, con la práctica, los usuarios puedan familiarizarse sin inconvenientes.
- P6— Mejorar las herramientas de comunicación en el mundo virtual, como la incorporación de chat de voz y sistemas de mensajería instantánea, para facilitar la colaboración y la interacción entre los usuarios para metaverso.

7.5. Discusión de resultados de la tesis

A continuación se detallan la discusión acorde a los resultados obtenidos por cada objetivo específico:

El diseño del entorno 3D ha sido exitoso, siguiendo los principios de realidad virtual y metaverso, para ofrecer una experiencia inmersiva y realista. Los resultados obtenidos en la representación visual de la planta troncal con enfoque de Smart Factory han sido consistentes con investigaciones previas que destacan la importancia de la visualización 3D en aplicaciones de realidad virtual. La representación detallada de la fábrica ha facilitado la detección temprana de posibles problemas de diseño y la experimentación con diferentes opciones de manera ágil. Estos hallazgos concuerdan con estudios que resaltan la utilidad de la realidad virtual en la toma de decisiones y diseño de instalaciones [74].

El desarrollo iterativo del *framework* ha sido clave para integrar de manera efectiva las funciones de diseño modular y monitorización de procesos en el entorno virtual. La colaboración y comunicación entre usuarios se ha visto favorecida gracias a esta estructura, lo que ha mejorado significativamente la experiencia de trabajo en equipo y la toma de decisiones conjunta. Estos resultados están en consonancia con investigaciones que destacan la importancia de la colaboración en entornos virtuales y cómo esta mejora la efectividad y productividad en el trabajo [7].

La validación integral del sistema de realidad virtual ha sido un paso fundamental para garantizar su efectividad en la *Smart Factory*. Las pruebas y experimentación colaborativa han demostrado la destacada capacidad de colaboración y comunicación multiusuario en el entorno de metaverso. Los participantes han experimentado una experiencia fluida y satisfactoria al interactuar con la aplicación, lo que respalda la solidez del diseño y desarrollo del *framework*. Estos hallazgos están en línea con investigaciones que resaltan la importancia de evaluar la experiencia del usuario y el rendimiento en aplicaciones de realidad virtual [98].

La necesidad de trabajar de forma colaborativa en entornos virtuales, es de gran importancia dado que los miembros de los equipos de trabajo están cada vez más dispersos en un mundo interconectado. Los entornos virtuales colaborativos (EVC) se destacan como una solución para proporcionar a los participantes una sensación de estar juntos y permitirles interactuar en tiempo real sin importar su ubicación física.

En el contexto actual, las tecnologías de realidad virtual y 3D aún no son ampliamente conocidas y aplicadas en contextos reales, especialmente en el ámbito industrial. Sin embargo, diversas investigaciones han demostrado la importante aplicación de estas tecnologías en áreas educativas, formativas e industriales [1], [38], [45], [66], y [73]. Esta tesis ha contribuido al resaltar la versatilidad y relevancia del metaverso impulsado por realidad virtual al desarrollar un enfoque para la colaboración en equipo y el procesamiento de información utilizando herramientas de entorno virtual 3D y realidad virtual.

El enfoque de creación de metaversos a pequeña escala presentado en este trabajo permite a los desarrolladores continuar diseñando y desarrollando nuevas funciones para mejorar la colaboración en equipo mediante realidad virtual. La transición de las formas de trabajo tradicionales hacia entornos virtuales 3D inmersivos brinda la posibilidad de una mayor interacción y comunicación sin necesidad de estar físicamente presentes en el mismo lugar. Esto permite a los usuarios conectarse desde cualquier parte del mundo y establecer un ambiente colaborativo más flexible y accesible.

La aplicación del metaverso en entornos industriales, como la *Smart Factory*, presenta un gran potencial para mejorar la productividad y eficiencia en la toma de decisiones. Los desarrolladores de metaversos pueden centrar sus investigaciones en nuevas y únicas capacidades multimedia en entornos virtuales 3D con realidad virtual, fomentando el intercambio de conocimientos y la colaboración en diversos sectores productivos. La utilización de metaversos puede optimizar las actividades de educación, servicios, reuniones, compras y ventas, y otras interacciones que requieran colaboración y comunicación entre múltiples personas en distintos lugares.

Los resultados obtenidos en esta investigación representan una primera evidencia de aplicación en el campo de la realidad virtual y 3D, mostrando el potencial de estas tecnologías en diversos contextos, incluyendo la *Smart Factory*. Sin embargo, se reconoce que es fundamental avanzar en nuevos trabajos prácticos que demuestren la aceptabilidad como la efectividad de estas tecnologías en entornos reales. Este progreso tecnológico debe tener en cuenta los costos asociados a su desarrollo e implementación, pero también reconociendo las oportunidades y beneficios que pueden aportar en términos de eficiencia y optimización en distintos ámbitos industriales para entrenamiento y capacitación.

Conclusiones y trabajos futuros

A continuación se presentan las conclusiones de este trabajo, así como los trabajos futuros:

8.1. Conclusiones

- La investigación ha demostrado que los entornos virtuales colaborativos en 3D, basados en realidad virtual y metaverso, pueden proporcionar una experiencia inmersiva y realista para el trabajo colaborativo en tiempo real. Los participantes pueden interactuar y comunicarse efectivamente, sin importar su ubicación geográfica, lo que facilita la colaboración a distancia y el aprendizaje conjunto.
- Se diseñó y desarrolló un *framework* de sistema de realidad virtual basado en metaverso que integra funciones de diseño modular y monitorización de procesos en *Smart Factory*. Este *framework* proporciona un entorno 3D inmersivo y realista para representar una planta troncal de *Smart Factory*, permitiendo la colaboración y comunicación efectiva entre los usuarios.
- El diseño modular y la monitorización en *Smart Factory* fueron elementos clave en el desarrollo del *framework* de realidad virtual. Estos componentes permiten la adaptabilidad y flexibilidad de los sistemas, facilitando la reconfiguración de los módulos y la identificación de problemas en los procesos industriales.
- La incorporación de un entorno de metaverso en el *framework* brinda una experiencia inmersiva y co-presencia entre los usuarios, fomentando la colaboración y el trabajo en equipo en actividades de interés común. Esto permite a los participantes interactuar en tiempo real, sin importar su ubicación geográfica.
- Las pruebas de funcionalidad y usabilidad del aplicativo de realidad virtual mostraron resultados satisfactorios en términos de aprendizaje, facilidad de uso y satisfacción del usuario. Estos hallazgos respaldan la viabilidad y utilidad del *framework* en entornos de trabajo colaborativo.

8.2. Trabajos futuros

- Investigar y desarrollar estrategias para mejorar la eficiencia y rendimiento del sistema de realidad virtual en términos de velocidad de procesamiento, calidad gráfica y latencia, con el fin de proporcionar una experiencia aún más inmersiva y realista para los usuarios.
- Explorar la aplicación del *framework* de realidad virtual en otros sectores industriales, como la medicina, la arquitectura o la simulación de desastres, para evaluar su utilidad y adaptabilidad en diferentes contextos.
- Realizar estudios de usabilidad y satisfacción del usuario a largo plazo para evaluar el impacto y beneficios a largo plazo del uso del sistema de realidad virtual en entornos de trabajo colaborativo y *Smart Factory*.
- Investigar y desarrollar técnicas avanzadas de monitorización con la integración de tecnologías emergentes en tiempo real en *Smart Factory*, como el uso de sensores inteligentes, análisis de big data, simulación, robótica colaborativa, ciberseguridad, etc., para mejorar la interacción, personalización y adaptabilidad del sistema a las necesidades específicas de los usuarios.
- Investigar y desarrollar técnicas de gamificación en los entornos virtuales colaborativos, con el fin de mejorar la motivación, el compromiso y el aprendizaje de los participantes.
- Realizar estudios longitudinales para evaluar el impacto a largo plazo de los entornos virtuales colaborativos en la productividad y eficiencia de las organizaciones, así como en la satisfacción y bienestar de los usuarios.

8.3. Contribuciones de esta tesis

La presente tesis doctoral ofrece importantes contribuciones en el campo de la realidad virtual, el metaverso, el diseño modular y la monitorización en entornos de *Smart Factory*. A través de los resultados obtenidos, estas contribuciones mejoran y amplían el conocimiento existente en estos temas, y pueden tener implicaciones significativas para el desarrollo de futuras investigaciones en el campo de la realidad virtual.

A continuación, se detallan los principales aportes realizados:

- Propuesta de desarrollo de un *framework* de realidad virtual de forma iterativa.
- Desarrollo de un sistema de componentes para diseño 3D en realidad virtual.
- Estudio de tecnologías de la *Smart Factory* y su aplicación con la realidad virtual.
- Desarrollo de un sistema multijugador basado en metaverso para colaboración y comunicación.
- Desarrollo de un sistema de configuración modular para diseño de instalaciones industriales.
- Desarrollo de un sistema de monitorización de procesos basado en *Smart Factory*.

Productos de investigación

Los productos de investigación resultados de la tesis se han publicado en revistas de alto impacto para la comunidad científica. La Tabla 8.1 resume los productos obtenidos de la investigación:

Contribuciones	Producto/Actividad
<i>Contribuciones de investigación:</i> Propuesta de una metodología para el diseño de plantas de producción a pequeña escala en <i>Smart Factory</i> , este aporte permite a los diseñadores de instalaciones industriales seguir una serie de pasos adaptados bajo el concepto modular y de Industria 4.0 para diseñar adecuadamente la distribución de planta.	<p>Publicación artículo de revista</p> <p>L. O. Alpala et al. <i>Methodology for the design and simulation of industrial facilities and production systems based on a modular approach in an industry 4.0 context</i>. <i>Dyna</i>, 2018, vol. 85, no 207, p. 243-252. https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.68545</p>
<i>Contribuciones de investigación:</i> Desarrollo de un <i>Framework</i> de sistema de realidad virtual mediante el enfoque de metaverso. Este sistema permite a los usuarios aprender y practicar habilidades y técnicas en un entorno de realidad virtual, mejorando su preparación para trabajar en una fábrica inteligente.	<p>Publicación artículo de revista</p> <p>L. O. Alpala et al. <i>Smart Factory using virtual reality and online multi-user: Towards a metaverse for experimental Frameworks</i>. <i>Applied Sciences</i>, 2022, vol. 12, no 12, p. 6258. https://doi.org/10.3390/app12126258</p>

TABLA 8.1: Productos de investigación de la tesis doctoral.

Repositorio de proyecto Digital Factory Metaverse

Disponibilidad del ejecutable del proyecto

Se pone a disposición de los investigadores la versión beta del ejecutable del proyecto Digital Factory Metaverse, la cual pueden descargar desde la plataforma Virprot <https://virprot.com/Proyecto/Ref=DIGITAL-FACTORY-METAVVERSE> opción descargas.

Se recomienda contar con los requisitos mínimos recomendados de los equipos de gafas de realidad virtual y cómputo para poder experimentar una buena experiencia de usuario.

Disponibilidad del código fuente y documentación

Digital Factory Metaverse está disponible gratuitamente en una versión limitada para descargar a través del repositorio GitHub como un paquete de Unreal Engine <https://github.com/mickluis/framework-vr-metaverse>. En cuanto a la documentación y soporte, están disponibles en el wiki de GitHub <https://github.com/mickluis/framework-vr-metaverse/wiki> y también en la plataforma de realidad virtual y metaversos Virprot/proyectos/DIGITAL-FACTORY-METAVVERSE <https://virprot.com/Proyecto/Ref=DIGITAL-FACTORY-METAVVERSE>.

Plugins Utilizados

Al proyecto se le ha agregado (plugins) para su funcionamiento, los cuales por derechos de autor se deben adquirir en la plataforma de Epic Games <https://www.unrealengine.com/marketplace/en-US/store?sessionInvalidated=true>.

- Plugins de comunicación multiusuario: EOS core, Vivox Core
- Plugins de bases de datos: Json, Socket.io
- Plugins de comunicación web: Web view y Web server

Cuestionario de pruebas de usabilidad

Para las pruebas de usabilidad con los usuarios, se ha realizado un cuestionario con preguntas para las categorías de experiencia de usuario, preparación y control de dispositivos, multiusuario, efectos de inmersión, diseño modular y monitorización. A continuación, se proporciona el enlace del repositorio del proyecto donde se puede encontrar el cuestionario utilizado en el proceso de pruebas de usabilidad con los usuarios y los resultados de las pruebas por preguntas: <https://github.com/mickluis/framework-vr-metaverse>. El propósito del repositorio es mejorar y actualizar información del proyecto para la comunidad interesada en el desarrollo del Framework.

A continuación se detallan las preguntas tenidas en cuenta en el cuestionario de pruebas de usabilidad.

Experiencia del usuario

1. Aprendizaje:- ¿Qué tan rápido pudo aprender a manejar el sistema de realidad virtual?

- Muy rápido
- Rápido
- Moderado
- Lento
- Muy lento

2. Ayuda:- ¿Cuántas veces necesitó asistencia o ayuda para manejar el sistema de realidad virtual?

- Ninguna vez
- Una vez
- Varias veces
- Frecuentemente
- Siempre

3. Evaluación de la funcionalidad de la aplicación:

- En una escala del 1 al 5, ¿cómo calificaría la interactividad de la aplicación?
- En una escala del 1 al 5, ¿cómo calificaría la calidad de los recorridos y simulaciones en la aplicación?

4. Mundos virtuales 3D con RV vs. otras tecnologías:- ¿Cuál fue su experiencia al comparar la realidad virtual con otras tecnologías de simulación 3D?

- La realidad virtual es mucho mejor
- La realidad virtual es mejor
- Son similares
- Otras tecnologías son mejores
- Otras tecnologías son mucho mejores

Preparación y Control de Dispositivos

1. Lugar de la prueba: - ¿Dónde se realizó la prueba de realidad virtual?

- Laboratorio
- Domicilio del usuario

2. Errores críticos: - ¿Experimentó algún problema crítico relacionado con la configuración o el equipo de realidad virtual?

- No hubo problemas críticos
- Hubo algunos problemas menores
- Hubo problemas significativos

3. Manejo de los controles: - ¿Se sintió cómodo y seguro utilizando los controles del sistema de realidad virtual?

- Muy cómodo y seguro
- Cómodo y seguro
- Neutral
- Incómodo e inseguro
- Muy incómodo e inseguro

4. Utilización de equipos de realidad virtual: - ¿Qué tan satisfactoria fue la experiencia con los dispositivos de realidad virtual en términos de comodidad y rendimiento?

- Muy satisfactoria
- Satisfactoria
- Neutral
- Insatisfactoria
- Muy insatisfactoria

Multiusuario

1. Comunicación: - ¿Qué medio de comunicación dentro y fuera de la aplicación encontró más efectivo?

- Chat de texto

- Voz en tiempo real
- Mensajes de audio
- Otro (especificar):

2. Colaboración en equipo: - ¿Qué tan eficaz fue la colaboración con otros usuarios para realizar tareas en equipo?

- Muy eficaz
- Eficaz
- Moderado
- Poco eficaz
- Nada eficaz

3. Conectividad multiusuario: - ¿Experimentó problemas de conectividad durante la prueba en línea?

- No hubo problemas de conectividad
- Algunas interrupciones ocasionales
- Problemas frecuentes de conectividad

4. Avatares: - ¿Qué tan bien representado se sintió con su avatar dentro del mundo virtual?

- Muy bien representado
- Bien representado
- Neutral
- Mal representado
- Muy mal representado

Efectos de inmersión

1. Malestar general: - ¿Experimentó algún malestar general durante o después de la prueba de realidad virtual?

- No hubo malestar
- Algo de malestar
- Malestar moderado
- Malestar significativo

2. Sensación de vértigo: - ¿Experimentó alguna sensación de vértigo o mareo mientras usaba la realidad virtual?

- No hubo sensación de vértigo
- Poca sensación de vértigo
- Moderada sensación de vértigo
- Sensación de vértigo significativa

3. Sudoración: - ¿Experimentó sudoración en la frente, las manos o alguna otra parte del cuerpo durante la prueba?

- No hubo sudoración
- Poca sudoración
- Sudoración moderada

- Sudoración significativa

4. Náuseas: - ¿Experimentó alguna sensación de náuseas mientras utilizaba la realidad virtual?

- No hubo náuseas

- Poca sensación de náuseas

- Náuseas moderadas

- Náuseas significativas

Diseño modular

1. Comprensión del diseño modular: - ¿Comprendió claramente los conceptos de diseño modular en una Smart Factory o planta de producción?

- Sí, completamente

- Sí, en su mayoría

- Neutral

- No del todo

- No comprendió nada

2. Identificación de los componentes modulares: - ¿Pudo identificar los componentes modulares en una instalación industrial y comprender cómo se pueden reorganizar y combinar para diferentes configuraciones?

- Sí, fácilmente

- Sí, con cierta dificultad

- Neutral

- No del todo

- No pudo identificarlos

3. Diseño de una instalación modular: - ¿Pudo diseñar una instalación modular utilizando diferentes componentes y configuraciones?

- Sí, fácilmente

- Sí, con cierta dificultad

- Neutral

- No del todo

- No pudo diseñarla

4. Evaluación de la modularidad de una instalación: - ¿Pudo evaluar la modularidad de una instalación existente y proponer mejoras en su diseño para aumentar la modularidad?

- Sí, fácilmente

- Sí, con cierta dificultad

- Neutral

- No del todo

- No pudo evaluarla

Monitorización

1. Nivel de comprensión de los datos: - ¿Comprendió los datos de monitoreo en tiempo real y los datos históricos fácilmente?

- Sí, completamente
- Sí, en su mayoría
- Neutral
- No comprendió los datos

2. Interacción del usuario con los monitores: - ¿La interacción con el sistema de monitoreo fue fácil y eficiente?

- Sí, totalmente
- Sí, en su mayoría
- Neutral
- No del todo
- No fue fácil ni eficiente

3. Precisión de la identificación de problemas: - ¿Pudo identificar y diagnosticar problemas en los procesos industriales utilizando el sistema de monitorización con precisión?

- Sí, con gran precisión
- Sí, con cierta precisión
- Neutral
- No del todo
- No pudo identificarlos con precisión

4. Tasa de errores de usuario: - ¿Experimentó errores al utilizar el aplicativo de realidad virtual y al monitorear los procesos industriales?

- No hubo errores
- Pocos errores
- Algunos errores
- Muchos errores
- Muchos errores graves

5. Evaluación de la monitorización en Smart Factory: - ¿Pudo evaluar la monitorización de una instalación existente y proponer mejoras en sus sistemas de monitorización en Smart Factory?

- Sí, fácilmente
- Sí, con cierta dificultad
- Neutral
- No del todo
- No pudo evaluarla

Aplicación de la metodología SLP para el proyecto Digital Factory Metaverse

La metodología SLP utilizada para el proyecto permitió estructurar el contenido de estudio técnico para el diseño de distribución de la planta de producción con enfoque de Smart Factory. En el repositorio del proyecto se pueden encontrar los detalles de la metodología SLP, su contenido y los diseños de distribución de la planta: <https://github.com/mickluis/framework-vr-metaverse>. El propósito del repositorio es mejorar y actualizar información del proyecto para la comunidad interesada en el desarrollo del Framework.

A continuación se presenta los datos más importantes resumidos utilizando la metodología SLP para el proyecto Digital Factory Metaverse.

Desarrollo de las fases de la metodología:

- *Fase 1: Análisis de productos-cantidades:* En esta fase, se realiza un estudio detallado de los productos, materias primas e insumos que se fabrican en la planta de producción. Se recopiló información sobre las características, cantidades y requerimientos de cada elemento, lo que proporciona una visión clara de los recursos necesarios para el proceso productivo. Este análisis es fundamental para comprender la demanda de los productos, identificar las necesidades de almacenamiento y logística, así como determinar los flujos de materiales y las interdependencias entre los diferentes elementos del sistema productivo. Durante esta fase, se recopiló información sobre los productos manufacturados, incluyendo su descripción, especificaciones técnicas, tamaños, pesos y volúmenes. También se consideran aspectos como la demanda prevista, las variaciones en la producción, los tiempos de ciclo y los requerimientos de almacenamiento. Esta información es analizada de manera sistemática para determinar la cantidad y tipo de productos que serán producidos, lo que servirá como base para el diseño de la distribución de la planta. Además, se lleva a cabo un análisis detallado de las materias primas e insumos

utilizados en el proceso productivo. Se identifican las características técnicas, los volúmenes requeridos, los tiempos de entrega y los requisitos de almacenamiento para cada uno de ellos. Esta información es útil para establecer la logística de abastecimiento, determinar los puntos de almacenamiento y definir los flujos de materiales dentro de la planta. Se ha estructurado un modelo de información para recopilación de datos como se muestra en la Tabla C.1

Producto	Descripción	Cantidad	Requerimientos
Producto A	Descripción A	- unidades/mes	Almacenamiento especial
Producto B	Descripción B	- unidades/mes	Almacenamiento estándar
Producto C	Descripción C	- unidades/mes	Manipulación delicada

TABLA C.1: Análisis de productos-cantidades

- Fase 2: Análisis y representación del proceso productivo:* n esta fase, se realiza un análisis detallado y una representación gráfica del proceso productivo de la planta. Se identifican las etapas clave del proceso, desde la recepción de materias primas hasta la obtención del producto final. Se recopila información sobre las secuencias de operaciones, los flujos de materiales y las interacciones entre las diferentes áreas y equipos de producción. Además, se tienen en cuenta los tiempos de ciclo, los tiempos de espera y las operaciones críticas del proceso.

La representación del proceso productivo se realiza mediante diagramas de flujo, diagramas de proceso o diagramas de bloques, según la complejidad y la necesidad de visualización. Estas representaciones gráficas ayudan a comprender mejor la secuencia de operaciones, la lógica de flujo y las interrelaciones entre las diferentes etapas del proceso. Se ha estructurado un modelo de información para recopilación de datos como se muestra en la Tabla C.2 para el proceso productivo de la planta de ensamble de automóviles, caso de estudio de esta investigación.

Etapa	Operaciones	Flujos de materiales
1	Recepción de materias primas	Materias primas
2	Almacenamiento de materias	Materias primas
3	Preparación y mezcla	Materias primas
4	Proceso de fabricación	Productos en proceso, subproductos, residuos
5	Ensamblaje	Componentes, productos en proceso
6	Pruebas y control de calidad	Productos en proceso, productos terminados
7	Empaque y embalaje	Productos terminados
8	Almacenamiento de productos	Productos terminados, productos en proceso
9	Despacho y distribución	Productos terminados, embalajes, documentos

TABLA C.2: Secuencia de operaciones y flujos de materiales para el proceso de ensamble de los automóviles

Diseño del proceso de producción de un Automóvil

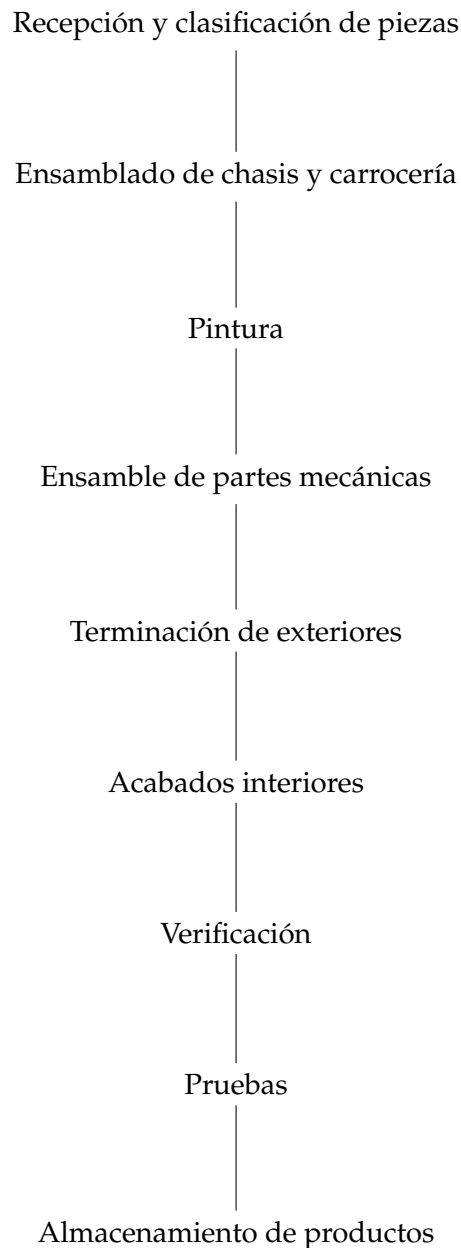


FIGURA C.1: Diagrama de Proceso de producción de un Automóvil

- *Fase 3: Análisis de factores y limitaciones:* En esta fase, se identifican y analizan los principales factores y limitaciones que influyen en el diseño y montaje del proyecto. Se consideran aspectos como el tamaño de la planta, las tecnologías de la Industria 4.0 que se aplicarán, los recursos disponibles, las restricciones normativas y las necesidades específicas del proyecto. Se realiza un estudio detallado de cada factor y se evalúa su impacto en el diseño de la distribución de la planta. Por ejemplo, se analiza el tamaño de la planta en relación con la capacidad de producción deseada y se determina si es necesario realizar ampliaciones o ajustes en el espacio. También se consideran las

tecnologías de la Industria 4.0 que se aplicarán, como sistemas de automatización, robótica, IoT, entre otros, y se evalúa su integración en la distribución de la planta. Además, se identifican las restricciones normativas y los requisitos de seguridad que deben cumplirse en el diseño de la planta. Se analizan las normas y regulaciones aplicables, como las relacionadas con el manejo de materiales peligrosos, las normas ergonómicas y las normas de accesibilidad. Estas restricciones y requisitos se tienen en cuenta al definir la distribución de la planta y se incorporan en las etapas posteriores del proceso de diseño.

- *Fase 4: Análisis de relación áreas:* En esta fase, se realiza un análisis detallado de las áreas que formarán parte de la instalación industrial. Se incluyen áreas como la administrativa, los servicios, los patios de maniobras y las áreas verdes. El objetivo es establecer la relación y la ubicación óptima de estas áreas dentro de la distribución de la planta.

Para llevar a cabo este análisis, se utilizan herramientas como el diagrama de relación de áreas, hojas de cálculo, diagramas adimensionales de bloques y flujos. Estas herramientas permiten visualizar las interrelaciones espaciales entre las diferentes áreas y determinar la ubicación más adecuada en función de la eficiencia operativa, la accesibilidad, la proximidad y la seguridad.

- *Fase 5: Análisis de relación de espacios:* En esta fase, se realiza el primer layout de la planta, teniendo en cuenta las necesidades del sistema productivo y los principios de la Industria 4.0. Se determina la disposición y ubicación de las diferentes áreas de la planta, los flujos de materiales, la ubicación de las maquinarias, los puestos de trabajo, las zonas de almacenamiento y otros elementos relevantes.

El objetivo principal es lograr una distribución eficiente y funcional, que optimice los flujos de trabajo, minimice los tiempos de desplazamiento y promueva la comunicación y colaboración entre los distintos equipos y áreas. Se utilizan herramientas como software de diseño asistido por computadora (CAD) para crear el diseño del layout en formato digital, lo que permite realizar ajustes y modificaciones de manera ágil y precisa.

- *Fase 6: Generación de alternativas de diseño:* En esta fase, se generan diferentes alternativas de diseño para comparar y evaluar diferentes propuestas de distribución de planta. Se exploran diferentes configuraciones espaciales y se realizan ajustes en función de los resultados obtenidos en las fases anteriores.

Se analizan aspectos como la eficiencia operativa, la utilización de espacios, la optimización de los flujos de trabajo y la adaptación a las tecnologías de la Industria 4.0. Se busca encontrar la opción que mejor se ajuste a los objetivos del proyecto, considerando factores como la capacidad de producción, la flexibilidad, la seguridad y la ergonomía.

- *Fase 7: Evaluación multicriterio:* En esta fase, se lleva a cabo una evaluación multicriterio de las alternativas de diseño generadas en la fase anterior. Se establecen criterios de evaluación previamente definidos y se asignan pesos o escalas de

ponderación a cada uno de ellos, según su importancia relativa en el contexto del proyecto.

Los criterios de evaluación pueden incluir aspectos como la eficiencia operativa, la utilización del espacio, la adaptabilidad a tecnologías de la Industria 4.0, la seguridad, la ergonomía y la sostenibilidad. Se utilizan técnicas de análisis y toma de decisiones, como análisis jerárquico de procesos (AHP) o análisis multicriterio (MCA), para comparar y clasificar las diferentes opciones de diseño.

- *Fase 8: Diseño seleccionado:* En la última fase, se selecciona el diseño definitivo de la distribución de la planta. Se elige la opción que mejor cumpla con los criterios establecidos y se realiza una revisión final para asegurar su viabilidad y coherencia con los objetivos del proyecto.

El diseño seleccionado incluye información detallada sobre todo el sistema productivo, cumpliendo con la normativa vigente y teniendo en cuenta la necesidad de adaptabilidad en el contexto de la Industria 4.0. Se documenta y presenta el diseño en formato 3D, utilizando herramientas de modelado y renderizado para visualizar y comunicar de manera efectiva la distribución de la planta.

Apéndice **D**

Documento de Diseño del Juego

A continuación se ofrece el enlace al Documento de Diseño del Juego (GDD), que proporciona detalles específicos sobre el desarrollo del aplicativo de realidad virtual. Dado que el documento es extenso, se ha optado por compartirlo en el repositorio del proyecto en una versión pública a través del siguiente enlace: <https://github.com/mickluis/framework-vr-metaverse> opción documento de diseño del juego.

El contenido del GDD se muestra a continuación:

Aspectos generales

- Género
- Plataformas
- Requisitos Mínimos
- Requisitos Recomendados
- Público objetivo

Historia y personajes

- Historia
- Personajes

Cómo se Juega

- Descripción General del aplicativo
- Experiencia de usuario
- Pautas
- Objetivos del aplicativo
- Mecánicas del aplicativo
- Diseño de niveles

Esquema de control para realidad virtual

- Movimiento: Desplazamiento y rotación mediante joysticks o touchpads.
- Interacción: Agarre con los gatillos, botones y palancas virtuales.
- Teletransportación: Para desplazarse a puntos específicos.
- Configuración personalizable en el menú del juego.

Estética e interfaz de usuario

- Configuración de los Niveles
- Clase de Nivel de Información
- Interfaces de Usuario
 - Selección Menú
 - Componente de paleta
 - Menús basados en paneles
 - Navegador de Datos
 - Estados del aplicativo

Sistema de Componentes

- Interacción de componentes
 - Seleccionar componentes
 - Componente de agarre
 - Eliminar componentes
 - Movimiento de Objetos
 - Movimiento de los transportes
 - Movimiento de Personal
 - Contador de Objetivos
 - Bloqueo de las Zonas
 - Habilitación de las misiones
 - Componente HUD
 - Data Asset
 - Paletas de desove de actor
 - List Data Asset
 - Actor Data Assets
 - Data Table
 - Otros componentes

Sistema modular

- Componentes de diseño modular

- Documentación de diseño modular
- Aplicaciones del diseño modular

Sistema de monitorización

- Componentes de monitorización
- Diseño de dashboards por tipo de monitorización
- Aplicaciones de los sistemas de monitorización aplicados en el proyecto

Musicalización y Diseño multimedia

- Diseño de imágenes
- Diseño de sonidos y efectos de sonido
- Animaciones y cinemáticas

Inteligencia artificial

- Comportamiento de los objetos
- Toma de decisiones de la IA

Materiales y Texturas

- Texturizado de objetos
- Uso de materiales PBR (Physically Based Rendering)

Static Mesh

- Modelado 3D de objetos y entornos
- Optimización de meshes

Iluminación

- Configuración de luces
- Uso de iluminación dinámica y estática

Equipo de trabajo

- Roles y responsabilidades del equipo
- Integrantes del equipo

Bases de datos para monitorización

El repositorio de información y bases de datos para la monitorización se deja disponible con el propósito de mantener actualizada la información utilizada en el proyecto caso de estudio y para proporcionar recursos a la comunidad científica y a nuevos investigadores. Esto promueve la transparencia, el acceso abierto a los datos, la colaboración y el avance del conocimiento en el campo de la monitorización.

En el siguiente enlace se muestra el repositorio que contiene las bases de datos para monitorización tenidas en cuenta para el desarrollo de este proyecto: <https://github.com/mickluis/framework-vr-metaverse>.

Bases de Datos para la Monitorización en una Planta de Ensamble de Automóviles en Smart Factory

Monitorización por Procesos

- Base de datos de seguimiento de procesos de ensamblaje:
 - Registro de inicio y finalización de cada etapa del ensamblaje.
 - Datos de producción por fase y tiempo de ciclo de ensamblaje.
 - Identificación de operadores y maquinaria involucrada en cada proceso.
 - Registros de calidad y control de defectos durante el ensamblaje.
- Base de datos de rendimiento de procesos:
 - Registro de eficiencia y productividad de cada línea de ensamblaje.
 - Análisis de tiempos de inactividad y paradas no programadas.
 - Indicadores clave de rendimiento (KPI) para evaluar el desempeño.

Monitorización por Maquinaria y Robots

- Base de datos de estado de la maquinaria y robots:
 - Registro del estado operativo de cada máquina y robot en tiempo real.
 - Datos de mantenimiento preventivo y correctivo.
 - Información sobre averías y reparaciones.

- Base de datos de utilización de maquinaria y robots:
 - Registro de tiempo de uso de cada equipo.
 - Cálculo de la utilización y eficiencia de las máquinas y robots.

Monitorización por Calidad de Producto

- Base de datos de control de calidad de ensamblaje:
 - Registro de datos de inspección y pruebas de calidad en línea de producción.
 - Trazabilidad de componentes y piezas utilizadas en cada vehículo.
 - Información sobre desviaciones y acciones correctivas.
- Base de datos de feedback de clientes:
 - Registro de comentarios y sugerencias de los clientes sobre la calidad del automóvil.
 - Evaluación de satisfacción del cliente y retroalimentación.

Monitorización por Recursos y Logística

- Base de datos de inventario y suministros:
 - Registro de existencias de piezas, componentes y materiales.
 - Gestión de pedidos y control de reposición de inventario.
- Base de datos de recursos humanos:
 - Registro de información del personal, habilidades y formación.
 - Gestión de horarios y asignación de tareas en la línea de ensamblaje.

Guías de prácticas de laboratorio para el aplicativo de realidad virtual

Se desarrolló un conjunto de guías de laboratorio para el aplicativo de realidad virtual. Estas guías tienen como objetivo mejorar la experiencia de los usuarios al utilizar el aplicativo y permitirles realizar prácticas de manera estructurada.

Las guías abarcan temas de producción, logística, almacenamiento, diseño modular, monitorización y Smart Factory, proporcionando a los usuarios una comprensión completa de diversas áreas relevantes para la realidad virtual en entornos industriales.

En total, se han diseñado 10 guías de laboratorio, disponibles en el repositorio del proyecto en el siguiente enlace: <https://github.com/mickluis/framework-vr-metaverse>. Cada guía incluye información general de la práctica, objetivos, proceso de desarrollo y marco teórico.

De igual manera puede consultar, las guías de prácticas en la plataforma Virprot-<https://virprot.com/Proyecto/Ref=DIGITAL-FACTORY-METAVERSE> opción guías de laboratorio.

A continuación se muestra un ejemplo de guía de laboratorio:




Tema 1: Recepción de Mercancía

Práctica 1: Recepción de materiales



 **Lugar:** Centro logístico

 **Tiempo estimado:** 20 min

 **Nivel de dificultad:** Básico


 **Plataformas:** Realidad Virtual y Windows 64

 **Modo:** Un jugador- multijugador

 **Manejo de controles:** Ver manual de usuario 

 **Recursos:** palets, cajas, estanterías


 **Modelo evaluación:** Grabación de video, captura de imagenes, sistema de guardado de la práctica


 **Palabras clave:** Recepción de mercancía, control de entrada, organización de mercancía, centro logístico, control de calidad, visualización de datos

Objetivos

- Conocer la importancia del proceso de recepción y ubicación de mercancías dentro del centro logístico.
- Aprender el concepto de control de entrada. Control cualitativo y control cuantitativo.
- Aprender la responsabilidad que se tiene en la recepción y organización de mercancías

Desarrollo de la práctica

Esta práctica contiene video tutorial en el siguiente enlace 

Guía paso a paso en el videojuego 

Descripción Práctica guiada

En esta práctica el usuario conocerá como funciona el proceso de recepción de mercancías, mediante un control de entrada, utilizando herramientas tecnológicas, que permitan que esta actividad se lleve a cabo de manera rápida y eficaz.

Pasos a Seguir

1. Recibir los materiales (especificar el tipo de material): Una vez se abre la compuerta de acople del centro logístico el usuario entrará a descargar una de las unidades de carga y la colocará sobre una mesa de trabajo.
2. Verificar la calidad del material (como daños-medidas, etc) o que todo el material esté en buenas condiciones: Revisará la unidad de carga. Separando las cajas de color negro que serán consideradas de baja calidad y ubicadas en la zona de producto defectuoso. Las cajas de color normal se organizarán y clasificarán posteriormente.
3. Organizar y clasificar por referencias (utilizar un lector de código de barras): una vez se haya verificado las condiciones del material, se prosigue a la organización del mismo mediante lectores de código de barras que el usuario utilizará para leer las etiquetas en las cajas y determinar su ubicación dentro del almacén.
4. Asignar la mejor ubicación: Una vez se haya clasificado el producto, se lo llevará al estante asignado para ese producto.



Bibliografía

- [1] M. E. Beheiry et al. "Virtual Reality: Beyond Visualization". En: *Journal of Molecular Biology* 431.7 (mar. de 2019), págs. 1315-1321. DOI: [10.1016/j.jmb.2019.01.033](https://doi.org/10.1016/j.jmb.2019.01.033).
- [2] S. Sun et al. "Application of Virtual Reality Technology in Landscape Design". En: *2021 International Symposium on Artificial Intelligence and its Application on Media (ISAIAM)*. IEEE, mayo de 2021. DOI: [10.1109/isaiam53259.2021.00026](https://doi.org/10.1109/isaiam53259.2021.00026).
- [3] S. Kraus et al. "Facebook and the creation of the metaverse: radical business model innovation or incremental transformation?" En: *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research* 28.9 (feb. de 2022), págs. 52-77. DOI: [10.1108/ijebr-12-2021-0984](https://doi.org/10.1108/ijebr-12-2021-0984).
- [4] Meta. *Connect 2021: Nuestra visión del metaverso*. 2021. URL: <https://about.fb.com/ltam/news/2021/10/connect-2021-nuestra-vision-del-metaverso/> (visitado 12-10-2022).
- [5] M. Kerin y D. T. Pham. "A review of emerging industry 4.0 technologies in remanufacturing". En: *Journal of Cleaner Production* 237 (nov. de 2019), pág. 117805. DOI: [10.1016/j.jclepro.2019.117805](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117805).
- [6] B. Kelley y C. Tornatzky. "The Artistic Approach to Virtual Reality". En: *Proceedings of the 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry*. ACM, nov. de 2019. DOI: [10.1145/3359997.3365701](https://doi.org/10.1145/3359997.3365701).
- [7] J. Brookes et al. "Studying human behavior with virtual reality: The Unity Experiment Framework". En: *Behavior Research Methods* 52.2 (abr. de 2019), págs. 455-463. DOI: [10.3758/s13428-019-01242-0](https://doi.org/10.3758/s13428-019-01242-0).
- [8] C. J. Chen, S. C. Toh y W. M. Fauzy. "The theoretical framework for designing desktop virtual reality-based learning environments". En: *Journal of Interactive Learning Research* 15.2 (2004), págs. 147-167.

- [9] J. H. Steffen et al. "Framework of Affordances for Virtual Reality and Augmented Reality". En: *Journal of Management Information Systems* 36.3 (jul. de 2019), págs. 683-729. DOI: [10.1080/07421222.2019.1628877](https://doi.org/10.1080/07421222.2019.1628877).
- [10] W.-S. Kim. "Edge computing server deployment technique for cloud VR-based multi-user metaverse content". En: *Journal of Korea Multimedia Society* 24.8 (2021), págs. 1090-1100.
- [11] Z. He, R. Du y K. Perlin. "CollaboVR: A Reconfigurable Framework for Creative Collaboration in Virtual Reality". En: *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE, nov. de 2020. DOI: [10.1109/ismar50242.2020.00082](https://doi.org/10.1109/ismar50242.2020.00082).
- [12] M. Shahinmoghadam, W. Natephra y A. Motamedi. "BIM- and IoT-based virtual reality tool for real-time thermal comfort assessment in building enclosures". En: *Building and Environment* 199 (jul. de 2021), pág. 107905. DOI: [10.1016/j.buildenv.2021.107905](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107905).
- [13] S. Joshi et al. "Implementing Virtual Reality technology for safety training in the precast/ prestressed concrete industry". En: *Applied Ergonomics* 90 (ene. de 2021), pág. 103286. DOI: [10.1016/j.apergo.2020.103286](https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103286).
- [14] J. Wolfartsberger. "Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review". En: *Automation in Construction* 104 (ago. de 2019), págs. 27-37. DOI: [10.1016/j.autcon.2019.03.018](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.018).
- [15] D. Griol et al. "Developing enhanced conversational agents for social virtual worlds". En: *Neurocomputing* 354 (ago. de 2019), págs. 27-40. DOI: [10.1016/j.neucom.2018.09.099](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.09.099).
- [16] M. Sra, A. Jain y P. Maes. "Adding Proprioceptive Feedback to Virtual Reality Experiences Using Galvanic Vestibular Stimulation". En: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, mayo de 2019. DOI: [10.1145/3290605.3300905](https://doi.org/10.1145/3290605.3300905).
- [17] A. Alam y A. Mohanty. "Metaverse and Posthuman Animated Avatars for Teaching-Learning Process: Interperception in Virtual Universe for Educational Transformation". En: *Communications in Computer and Information Science*. Springer International Publishing, 2022, págs. 47-61. DOI: [10.1007/978-3-031-23233-6_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23233-6_4).
- [18] G. Gamelin et al. "Point-cloud avatars to improve spatial communication in immersive collaborative virtual environments". En: *Personal and Ubiquitous Computing* 25.3 (jul. de 2020), págs. 467-484. DOI: [10.1007/s00779-020-01431-1](https://doi.org/10.1007/s00779-020-01431-1).

- [19] G. Pedersen y K. Koumaditis. "Virtual Reality (VR) in the Computer Supported Cooperative Work (CSCW) Domain: A Mapping and a Pre-study on Functionality and Immersion". En: *Lecture Notes in Computer Science*. Springer International Publishing, 2020, págs. 136-153. DOI: [10.1007/978-3-030-49698-2_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49698-2_10).
- [20] J. Calvert y R. Abadia. "Impact of immersing university and high school students in educational linear narratives using virtual reality technology". En: *Computers & Education* 159 (dic. de 2020), pág. 104005. DOI: [10.1016/j.compedu.2020.104005](https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104005).
- [21] A. Borrego et al. "Embodiment and Presence in Virtual Reality After Stroke. A Comparative Study With Healthy Subjects". En: *Frontiers in Neurology* 10 (oct. de 2019). DOI: [10.3389/fneur.2019.01061](https://doi.org/10.3389/fneur.2019.01061).
- [22] Y.-L. Chen y C.-C. Hsu. "Self-regulated mobile game-based English learning in a virtual reality environment". En: *Computers & Education* 154 (sep. de 2020), pág. 103910. DOI: [10.1016/j.compedu.2020.103910](https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.103910).
- [23] Y.-J. Lan. "Immersion into virtual reality for language learning". En: *Psychology of Learning and Motivation*. Elsevier, 2020, págs. 1-26. DOI: [10.1016/bs.plm.2020.03.001](https://doi.org/10.1016/bs.plm.2020.03.001).
- [24] P. K. Murali, M. Kaboli y R. Dahiya. "Intelligent In-Vehicle Interaction Technologies". En: *Advanced Intelligent Systems* 4.2 (oct. de 2021), pág. 2100122. DOI: [10.1002/aisy.202100122](https://doi.org/10.1002/aisy.202100122).
- [25] X. Yao et al. "Enhancing wisdom manufacturing as industrial metaverse for industry and society 5.0". En: *Journal of Intelligent Manufacturing* (nov. de 2022). DOI: [10.1007/s10845-022-02027-7](https://doi.org/10.1007/s10845-022-02027-7).
- [26] D. Mourtzis et al. "Human centric platforms for personalized value creation in metaverse". En: *Journal of Manufacturing Systems* 65 (oct. de 2022), págs. 653-659. DOI: [10.1016/j.jmsy.2022.11.004](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.11.004).
- [27] N. F. Murodillayevich, U. G. Eshpulatovich y J. O. Pardaboyevich. "Integration of virtual reality and 3D modeling use of environments in education". En: *2019 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT)*. IEEE, nov. de 2019. DOI: [10.1109/icisct47635.2019.9011899](https://doi.org/10.1109/icisct47635.2019.9011899).
- [28] R. V. Kozinets. "Immersive netnography: a novel method for service experience research in virtual reality, augmented reality and metaverse contexts". En: *Journal of Service Management* 34.1 (mar. de 2022), págs. 100-125. DOI: [10.1108/josm-12-2021-0481](https://doi.org/10.1108/josm-12-2021-0481).
- [29] Y. Huang. "Comparative Study: How Metaverse Connect with China Laws". En: *SSRN Electronic Journal* (2021). DOI: [10.2139/ssrn.3955900](https://doi.org/10.2139/ssrn.3955900).

- [30] “Six Infinite Cyberspace Cages: The Internet and Virtual Reality”. En: *Technophobia!* University of Texas Press, dic. de 2006, págs. 147-179. DOI: [10.7560/709546-008](https://doi.org/10.7560/709546-008).
- [31] B. Kye et al. “Educational applications of metaverse: possibilities and limitations”. En: *Journal of Educational Evaluation for Health Professions* 18 (dic. de 2021), pág. 32. DOI: [10.3352/jeehp.2021.18.32](https://doi.org/10.3352/jeehp.2021.18.32).
- [32] D. W. Carruth. “Virtual reality for education and workforce training”. En: *2017 15th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*. IEEE, oct. de 2017. DOI: [10.1109/iceta.2017.8102472](https://doi.org/10.1109/iceta.2017.8102472).
- [33] K. G. Barrera y D. Shah. “Marketing in the Metaverse: Conceptual understanding, framework, and research agenda”. En: *Journal of Business Research* 155 (ene. de 2023), pág. 113420. DOI: [10.1016/j.jbusres.2022.113420](https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113420).
- [34] H. Du et al. “Rethinking Quality of Experience for Metaverse Services: A Consumer-based Economics Perspective”. En: *IEEE Network* (2023), págs. 1-8. DOI: [10.1109/mnet.131.2200503](https://doi.org/10.1109/mnet.131.2200503).
- [35] R. Cheng et al. “Will Metaverse Be NextG Internet? Vision, Hype, and Reality”. En: *IEEE Network* 36.5 (sep. de 2022), págs. 197-204. DOI: [10.1109/mnet.117.2200055](https://doi.org/10.1109/mnet.117.2200055).
- [36] A. Jovanović y A. Milosavljević. “VoRtex Metaverse Platform for Gamified Collaborative Learning”. En: *Electronics* 11.3 (ene. de 2022), pág. 317. DOI: [10.3390/electronics11030317](https://doi.org/10.3390/electronics11030317).
- [37] P. Kaliraj y T. Devi. *Industry 4.0 Technologies for Education*. Auerbach Publications, dic. de 2022. DOI: [10.1201/9781003318378](https://doi.org/10.1201/9781003318378).
- [38] S. Yaser et al. “FlexSim Simulation to Enhance Productivity of a Production Cell : A Case Study”. En: *2021 3rd Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference (NILES)*. IEEE, oct. de 2021. DOI: [10.1109/niles53778.2021.9600545](https://doi.org/10.1109/niles53778.2021.9600545).
- [39] Y. Li, D. Wang e Y. Liu. “The Application of Virtual Reality Technology in Logistics Training”. En: *Advances in Intelligent, Interactive Systems and Applications*. Springer International Publishing, 2019, págs. 668-675. DOI: [10.1007/978-3-030-02804-6_87](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02804-6_87).
- [40] Y. K. Dwivedi et al. “Metaverse beyond the hype: Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy”. En: *International Journal of Information Management* 66 (oct. de 2022), pág. 102542. DOI: [10.1016/j.ijinfomgt.2022.102542](https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2022.102542).
- [41] N. Taguchi. *The Routledge Handbook of Second Language Acquisition and Pragmatics*. Ed. por N. Taguchi. Routledge, ene. de 2019. DOI: [10.4324/9781351164085](https://doi.org/10.4324/9781351164085).

- [42] J. Legault et al. "Immersive Virtual Reality as an Effective Tool for Second Language Vocabulary Learning". En: *Languages* 4.1 (feb. de 2019), pág. 13. DOI: [10.3390/languages4010013](https://doi.org/10.3390/languages4010013).
- [43] T. T. D. Back, A. M. Tinga y M. M. Louwerse. "Learning in immersed collaborative virtual environments: design and implementation". En: *Interactive Learning Environments* (dic. de 2021), págs. 1-19. DOI: [10.1080/10494820.2021.2006238](https://doi.org/10.1080/10494820.2021.2006238).
- [44] M. Slater. "Immersion and the illusion of presence in virtual reality". En: *British Journal of Psychology* 109.3 (mayo de 2018), págs. 431-433. DOI: [10.1111/bjop.12305](https://doi.org/10.1111/bjop.12305).
- [45] M. G. Badilla-Quintana y F. J. Sandoval-Henríquez. "Students' Immersive Experience in Initial Teacher Training in a Virtual World to Promote Sustainable Education: Interactivity, Presence, and Flow". En: *Sustainability* 13.22 (nov. de 2021), pág. 12780. DOI: [10.3390/su132212780](https://doi.org/10.3390/su132212780).
- [46] J. Kim. "VIVR: Presence of Immersive Interaction for Visual Impairment Virtual Reality". En: *IEEE Access* 8 (2020), págs. 196151-196159. DOI: [10.1109/access.2020.3034363](https://doi.org/10.1109/access.2020.3034363).
- [47] S. F. M. Baigi et al. "Evaluation Tools for Digital Educational Games: A Systematic Review". En: *ACTA MEDICA IRANICA* (oct. de 2022). DOI: [10.18502/acta.v60i8.10835](https://doi.org/10.18502/acta.v60i8.10835).
- [48] M. Ríos-Hernández et al. "User-Centered Design and Evaluation of an Upper Limb Rehabilitation System with a Virtual Environment". En: *Applied Sciences* 11.20 (oct. de 2021), pág. 9500. DOI: [10.3390/app11209500](https://doi.org/10.3390/app11209500).
- [49] I. Karabegović, R. Turmanidze y P. Dašić. "Robotics and Automation as a Foundation of the Fourth Industrial Revolution - Industry 4.0". En: *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer International Publishing, 2020, págs. 128-136. DOI: [10.1007/978-3-030-40724-7_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_13).
- [50] A. Aoun et al. "A review of Industry 4.0 characteristics and challenges, with potential improvements using blockchain technology". En: *Computers & Industrial Engineering* 162 (dic. de 2021), pág. 107746. DOI: [10.1016/j.cie.2021.107746](https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107746).
- [51] J. Morgan. "Will we work in twenty-first century capitalism? A critique of the fourth industrial revolution literature". En: *Economy and Society* 48.3 (jul. de 2019), págs. 371-398. DOI: [10.1080/03085147.2019.1620027](https://doi.org/10.1080/03085147.2019.1620027).
- [52] Z. M. Cinar et al. "Digital Twins for Industry 4.0: A Review". En: *Lecture Notes in Management and Industrial Engineering*. Springer International Publishing, 2020, págs. 193-203. DOI: [10.1007/978-3-030-42416-9_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42416-9_18).

- [53] M. Wang et al. "Constructing an Edu-Metaverse Ecosystem: A New and Innovative Framework". En: *IEEE Transactions on Learning Technologies* 15.6 (dic. de 2022), págs. 685-696. DOI: [10.1109/tlt.2022.3210828](https://doi.org/10.1109/tlt.2022.3210828).
- [54] V. Getuli et al. "BIM-based immersive Virtual Reality for construction workspace planning: A safety-oriented approach". En: *Automation in Construction* 114 (jun. de 2020), pág. 103160. DOI: [10.1016/j.autcon.2020.103160](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103160).
- [55] L. Zhang et al. "Modeling and simulation in intelligent manufacturing". En: *Computers in Industry* 112 (nov. de 2019), pág. 103123. DOI: [10.1016/j.compind.2019.08.004](https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.08.004).
- [56] J. Ma et al. "Efficacy Investigation of Virtual Reality Teaching Module in Manufacturing System Design Course". En: *Journal of Mechanical Design* 141.1 (oct. de 2018). DOI: [10.1115/1.4041428](https://doi.org/10.1115/1.4041428).
- [57] S. Hollensen, P. Kotler y M. O. Opresnik. "Metaverse – the new marketing universe". En: *Journal of Business Strategy* (mar. de 2022). DOI: [10.1108/jbs-01-2022-0014](https://doi.org/10.1108/jbs-01-2022-0014).
- [58] J. Ribeiro et al. "Robotic Process Automation and Artificial Intelligence in Industry 4.0 – A Literature review". En: *Procedia Computer Science* 181 (2021), págs. 51-58. DOI: [10.1016/j.procs.2021.01.104](https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.104).
- [59] A. Rainnie y M. Dean. "Industry 4.0 and the future of quality work in the global digital economy". En: *Labour & Industry: a journal of the social and economic relations of work* 30.1 (dic. de 2019), págs. 16-33. DOI: [10.1080/10301763.2019.1697598](https://doi.org/10.1080/10301763.2019.1697598).
- [60] B. E. Jin y D. C. Shin. "The power of 4th industrial revolution in the fashion industry: what, why, and how has the industry changed?" En: *Fashion and Textiles* 8.1 (oct. de 2021). DOI: [10.1186/s40691-021-00259-4](https://doi.org/10.1186/s40691-021-00259-4).
- [61] L. A. Cárdenas-Robledo et al. "Extended reality applications in industry 4.0. – A systematic literature review". En: *Telematics and Informatics* 73 (sep. de 2022), pág. 101863. DOI: [10.1016/j.tele.2022.101863](https://doi.org/10.1016/j.tele.2022.101863).
- [62] S. Grabowska. "Smart Factories in the Age of Industry 4.0". En: *Management Systems in Production Engineering* 28.2 (mayo de 2020), págs. 90-96. DOI: [10.2478/mspe-2020-0014](https://doi.org/10.2478/mspe-2020-0014).
- [63] X. Liao et al. "Hetero-contact microstructure to program discerning tactile interactions for virtual reality". En: *Nano Energy* 60 (jun. de 2019), págs. 127-136. DOI: [10.1016/j.nanoen.2019.03.048](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.03.048).
- [64] C. Plotzky et al. "Virtual reality simulations in nurse education: A systematic mapping review". En: *Nurse Education Today* 101 (jun. de 2021), pág. 104868. DOI: [10.1016/j.nedt.2021.104868](https://doi.org/10.1016/j.nedt.2021.104868).

- [65] M. Lorenz et al. "Presence and User Experience in a Virtual Environment under the Influence of Ethanol: An Explorative Study". En: *Scientific Reports* 8.1 (abr. de 2018). DOI: [10.1038/s41598-018-24453-5](https://doi.org/10.1038/s41598-018-24453-5).
- [66] E. Wagemann y J. Martínez. "Realidad Virtual (RV) inmersiva para el aprendizaje en arquitectura". En: *EGA Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica* 27.44 (mar. de 2022), págs. 110-123. DOI: [10.4995/ega.2022.15581](https://doi.org/10.4995/ega.2022.15581).
- [67] D.-I. Han, M. C. tom Dieck y T. Jung. "User experience model for augmented reality applications in urban heritage tourism". En: *Journal of Heritage Tourism* 13.1 (feb. de 2017), págs. 46-61. DOI: [10.1080/1743873x.2016.1251931](https://doi.org/10.1080/1743873x.2016.1251931).
- [68] L. M. Herrera, J. C. Pérez y S. J. Ordóñez. "Developing spatial mathematical skills through 3D tools: augmented reality, virtual environments and 3D printing". En: *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 13.4 (jun. de 2019), págs. 1385-1399. DOI: [10.1007/s12008-019-00595-2](https://doi.org/10.1007/s12008-019-00595-2).
- [69] S. Vinodh et al. "Integration of continuous improvement strategies with Industry 4.0: a systematic review and agenda for further research". En: *The TQM Journal* 33.2 (ago. de 2020), págs. 441-472. DOI: [10.1108/tqm-07-2020-0157](https://doi.org/10.1108/tqm-07-2020-0157).
- [70] A. Jimeno-Morenilla et al. "Technology enablers for the implementation of Industry 4.0 to traditional manufacturing sectors: A review". En: *Computers in Industry* 125 (feb. de 2021), pág. 103390. DOI: [10.1016/j.compind.2020.103390](https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103390).
- [71] H. Nguyen et al. "Collaborative Data Analytics Using Virtual Reality". En: *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, mar. de 2019. DOI: [10.1109/vr.2019.8797845](https://doi.org/10.1109/vr.2019.8797845).
- [72] Y.-C. Huang et al. "An investigation of motivation and experience in virtual learning environments: a self-determination theory". En: *Education and Information Technologies* 24.1 (ago. de 2018), págs. 591-611. DOI: [10.1007/s10639-018-9784-5](https://doi.org/10.1007/s10639-018-9784-5).
- [73] B. Pokorni y C. Saba. "User Acceptance of Cognitive Assistance Systems in Smart Factories". En: *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer International Publishing, 2022, págs. 74-93. DOI: [10.1007/978-3-030-98015-3_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-98015-3_5).
- [74] L. O. Alpala et al. "Methodology for the design and simulation of industrial facilities and production systems based on a modular approach in an industry 4.0 context". En: *DYNA* 85.207 (oct. de 2018), págs. 243-252. DOI: [10.15446/dyna.v85n207.68545](https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.68545).
- [75] M. Richard. "Systematic layout planning". En: *IO Industrial Education Institute* 1 (dic. de 1973), pág. 1. DOI: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000797470624000>.
- [76] D. A. Bowman, D. Koller y L. F. Hodges. "A methodology for the evaluation of travel techniques for immersive virtual environments". En: *Virtual Reality* 3.2 (jun. de 1998), págs. 120-131. DOI: [10.1007/bf01417673](https://doi.org/10.1007/bf01417673).

- [77] X. Chen, M. Wang y Q. Wu. "Research and development of virtual reality game based on unreal engine 4". En: *2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*. IEEE. 2017, págs. 1388-1393. DOI: [10.1109/icsai.2017.8248503](https://doi.org/10.1109/icsai.2017.8248503).
- [78] U. Engine. *The Most Powerful Real-Time 3D Creation Tool*. 2021. URL: <https://www.unrealengine.com/en-US/> (visitado 12-10-2022).
- [79] U. Engine. *Unreal Engine 5 Documentation*. 2023. URL: <https://docs.unrealengine.com/5.0/en-US/> (visitado 15-04-2023).
- [80] A. Schmeil. "Designing collaboration experiences for 3D virtual worlds". En: 2012.
- [81] H. Lee, D. Woo y S. Yu. "Virtual Reality Metaverse System Supplementing Remote Education Methods: Based on Aircraft Maintenance Simulation". En: *Applied Sciences* 12.5 (2022), pág. 2667. DOI: [10.3390/app12052667](https://doi.org/10.3390/app12052667).
- [82] G. A. M. Urrutia et al. *Procesos de desarrollo para videojuegos*. 2015. URL: <https://148.210.21.18/ojs/index.php/culcyt/article/view/299> (visitado 13-10-2022).
- [83] A. M. Al-Ghaili et al. "A Review of Metaverse's Definitions, Architecture, Applications, Challenges, Issues, Solutions, and Future Trends". En: *IEEE Access* 10 (2022), págs. 125835-125866. DOI: [10.1109/access.2022.3225638](https://doi.org/10.1109/access.2022.3225638).
- [84] Spatial. *Plataforma de metaverso a gran escala*. 2023. URL: <https://www.spatial.io/> (visitado 12-10-2022).
- [85] altvr. *Plataforma de metaverso a gran escala*. 2023. URL: <https://altvr.com/> (visitado 12-10-2022).
- [86] H. Workrooms. *Plataforma de metaverso a gran escala*. 2023. URL: <https://www.oculus.com/experiences/quest/2514011888645651/> (visitado 12-10-2022).
- [87] engagevr. *Plataforma de metaverso a gran escala*. 2023. URL: <https://engagevr.io/> (visitado 12-10-2022).
- [88] simlab-vr collaboration. *Plataforma de metaverso a pequeña escala*. 2023. URL: <https://www.simlab-soft.com/3d-products/simlab-vr-collaboration.aspx> (visitado 12-10-2022).
- [89] innoarea. *Plataforma de metaverso a pequeña escala*. 2023. URL: <https://innoarea.com/productos/meet-vr/> (visitado 12-10-2022).
- [90] virtualwareco. *Plataforma de metaverso a pequeña escala*. 2023. URL: <https://www.virtualwareco.com/> (visitado 12-10-2022).
- [91] virprot. *Plataforma de metaverso a pequeña escala*. 2023. URL: <https://virprot.com/> (visitado 12-10-2022).

- [92] L. O. Alpala et al. "Smart Factory Using Virtual Reality and Online Multi-User: Towards a Metaverse for Experimental Frameworks". En: *Applied Sciences* 12.12 (jun. de 2022), pág. 6258. DOI: [10.3390/app12126258](https://doi.org/10.3390/app12126258).
- [93] L. Wu et al. "Design and implementation of a metaverse platform for traditional culture: the chime bells of Marquis Yi of Zeng". En: *Heritage Science* 10.1 (nov. de 2022). DOI: [10.1186/s40494-022-00828-w](https://doi.org/10.1186/s40494-022-00828-w).
- [94] J. Moon et al. "Data Collection Framework for Context-Aware Virtual Reality Application Development in Unity: Case of Avatar Embodiment". En: *Sensors* 22.12 (jun. de 2022), pág. 4623. DOI: [10.3390/s22124623](https://doi.org/10.3390/s22124623).
- [95] F. D. Felice et al. "Physical and digital worlds: implications and opportunities of the metaverse". En: *Procedia Computer Science* 217 (2023), págs. 1744-1754. DOI: [10.1016/j.procs.2022.12.374](https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.374).
- [96] D. K. Baroroh, C.-H. Chu y L. Wang. "Systematic literature review on augmented reality in smart manufacturing: Collaboration between human and computational intelligence". En: *Journal of Manufacturing Systems* 61 (oct. de 2021), págs. 696-711. DOI: [10.1016/j.jmsy.2020.10.017](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.10.017).
- [97] J. L. R. Tamayo, M. B. Hernández y H. G. Gómez. "Digital Data Visualization with Interactive and Virtual Reality Tools. Review of Current State of the Art and Proposal of a Model." En: *Revista ICONO14 Revista científica de Comunicación y Tecnologías emergentes* 16.2 (jul. de 2018), págs. 40-65. DOI: [10.7195/ri14.v16i2.1174](https://doi.org/10.7195/ri14.v16i2.1174).
- [98] M. Gómez Sánchez. *Test de usabilidad en entornos de Realidad Virtual*. 2018. URL: https://www.nosolousabilidad.com/articulos/test_usabilidad_realidad_virtual.htm (visitado 13-10-2022).
- [99] H. K. Kim et al. "Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment". En: *Applied Ergonomics* 69 (mayo de 2018), págs. 66-73. DOI: [10.1016/j.apergo.2017.12.016](https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.12.016).