

# INFORME PROYECTOS— 2023

**Desarrollo de gemelos digitales en operaciones robotizadas  
“DIGIBOT 2”**

**Informe final**

**Número de proyecto:** 22300005

**Expediente:** IMAMCA/2023/2

**Duración:** Del 01/01/2023 al 31/12/2023

**Coordinado en AIDIMME por:** José Luis Sánchez Asins

**AIDIMME**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO



GENERALITAT  
VALENCIANA

**iVACE**  
INSTITUTO VALENCIANO DE  
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL

**AIDIMME**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO



# ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> .....	<b>1</b>
<b>TABLA DE ILUSTRACIONES</b> .....	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	2
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	2
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO .....	3
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
2.1 ROBÓTICA INDUSTRIAL .....	4
2.2 REALIDAD EXTENDIDA.....	5
2.3 VISIÓN ARTIFICIAL .....	7
2.4 INTERACCIÓN HUMANO-ROBOT (HRI) .....	8
2.5 SÍNTESIS DE LA INTEGRACIÓN TECNOLÓGICA.....	8
<b>3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>9</b>
3.1 AVANCES RECIENTES EN RV Y ROBÓTICA PARA INDUSTRIA .....	9
3.2 ESTUDIOS DE CASO RELEVANTES .....	10
3.3 TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN RV Y ROBÓTICA: FABRICACIÓN PERSONALIZADA .....	11
3.4 BRECHAS Y OPORTUNIDADES IDENTIFICADAS .....	12
<b>4. DESARROLLO DEL PROYECTO</b> .....	<b>14</b>
4.1. POSIBLES TECNOLOGÍAS PARA EL DESARROLLO .....	14
4.1.1 SISTEMA DE REALIDAD VIRTUAL .....	14
4.1.2 ENTORNO DE DESARROLLO 3D .....	17
4.1.3 ROBÓTICA COLABORATIVA .....	20
4.2 DESARROLLO DEL SISTEMA.....	20
4.2.1 CONFIGURACIÓN DEL ENTORNO VIRTUAL.....	20
4.2.2 SISTEMA DE CINEMÁTICA INVERSA.....	22
4.2.3 SISTEMA DE CONTROL DEL ROBOT .....	24
4.2.4 GENERACIÓN DEL SCRIPT DE ROBOT COMPATIBLE CON UR .....	25
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>26</b>

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ DESARROLLADA .....	26
5.3 PRUEBAS CON USUARIOS .....	27
<b>6. DISCUSIÓN.....</b>	<b>28</b>
6.1 COMPARACIÓN CON EL ESTADO DEL ARTE .....	28
6.3 LIMITACIONES DEL PROYECTO .....	28
<b>7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>29</b>
7.1 CONCLUSIONES GENERALES.....	29
7.3 TRABAJO FUTURO.....	30
<b>8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>31</b>
<b>9. ANEXOS.....</b>	<b>32</b>
9.1 PROGRAMA DE ROBOT GENERADO POR DIGIBOT .....	32

## TABLA DE CUADROS

Tabla 1 - Parámetros DH para el UR5 .....	23
---	----

## TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Utilización de las Meta Quest 3 (izq.) y las Apple Vision Pro (der.) Fuentes: trustedreviews y Flickr.....	1
Ilustración 2 - Logo de Unity.....	3
Ilustración 3 - Barreras físicas en los robots tradicionales Fuente: Coches.com .....	4
Ilustración 4 - Usuario trabaja junto con un robot colaborativo. Fuente: Elaboración propia.....	5
Ilustración 5 - Entorno completamente inmersivo en la realidad virtual Fuente: TrustedReviews .....	6
Ilustración 6 - Esquema de la realidad extendida Fuente: (De Moura Costa, Roberto Petry, & Paulo Moreira, 2022).....	7
Ilustración 7 - Niveles de colaboración trabajador-robot. Fuente: (De Moura Costa, Roberto Petry, & Paulo Moreira, 2022).....	10
Ilustración 8 - Sistema de programación de Realtime Robotics (Fuente: MIT News)....	11
Ilustración 9 - Gafas Meta Quest 2 Fuente: (Meta Platforms, 2023).....	14
Ilustración 10 - Valve Index Fuente: (Valve Inc., 2022) .....	15
Ilustración 11 - Mujer utiliza la Apple Vision Pro. Fuente: Apple.....	17
Ilustración 12 - Robot UR. Fuente: Universal Robots.....	20
Ilustración 13 - Asset 3D del UR5. Fuente: Universal Robots y FreeCAD.....	21
Ilustración 15 - Superficies en el asset 3D del UR5. Fuente: Obtención propia.....	21
Ilustración 14 - Integración del modelo 3D en Unity. Fuente: obtención propia .....	21
Ilustración 16 - Entorno 3D del proyecto. Fuente: Obtención propia.....	22
Ilustración 17 - Ejes del UR5 y parámetros DH. Fuente: (Andersen, 2018) .....	24
Ilustración 18 - Distribución de los mandos y efecto en el modelo 3D. Fuente: Elaboración propia.....	25
Ilustración 19 - Interfaz de RV de DIGIBOT. Fuente: Elaboración propia.....	26
Ilustración 20 - Camino desarrollado con DIGIBOT desde varios puntos de vista. Fuente: Elaboración propia.....	27
Ilustración 21 - Programación de movimiento de pieza utilizando una pinza. Fuente: Elaboración propia.....	27



## 1. Introducción

La revolución industrial 4.0 ha traído consigo un sinfín de innovaciones tecnológicas, marcando el inicio de una era donde la interacción entre los humanos y las máquinas alcanza un nivel de sinergia sin precedentes. En este escenario, el proyecto "Digibot" emerge como una iniciativa pionera, destinada a superar las barreras existentes en la programación y control de robots industriales mediante la integración de tecnologías de realidad virtual (RV).

Este proyecto no solo representa un salto cualitativo en el ámbito de la robótica industrial, sino que también refleja la creciente tendencia notable en el mercado, de la evolución de los sistemas de computación hacia sistemas de realidad extendida (XR). Esta tendencia se puede ver en la mejora sustancial que han tenido los dispositivos de realidad virtual, mixta o aumentada, así como el considerable esfuerzo demostrado por las grandes empresas tecnológicas en desarrollar sistemas de computación en esta línea. En particular, destacan la empresa Meta con las distintas versiones de las gafas Meta Quest, y Apple con la reciente introducción de las Apple Vision Pro. En la **Ilustración 1** se muestran personas usando estos dos dispositivos.



*Ilustración 1 - Utilización de las Meta Quest 3 (izq.) y las Apple Vision Pro (der.)  
Fuentes: trustedreviews y Flickr*

### 1.1 Antecedentes

Históricamente, la programación de robots industriales ha requerido de una especialización técnica elevada, limitando su gestión a un grupo reducido de expertos. Esta situación se materializa en que las empresas que desean utilizar este tipo de maquinaria deben contratar personal con alta cualificación o bien realizar algún contrato con una empresa de ingeniería especializada en programación de robots, lo que se traduce en un cuello de botella, así como unos costes muy elevados, para muchas empresas que buscan adaptarse rápidamente a las demandas del mercado y a la vez optimizar sus procesos de producción.

En respuesta a esta problemática, se introdujo la primera iteración del proyecto Digibot que sentó las bases del proyecto actual, a través del desarrollo de un sistema avanzado

de visión artificial. Este sistema fue capaz de identificar piezas automáticamente y comunicar esta información al robot de manera eficiente, permitiendo la selección adecuada de la posición y herramienta para su manipulación. Este avance significativo no solo demostró la viabilidad de integrar tecnologías complementarias en la robótica, sino que también abrió la puerta a explorar cómo la realidad virtual podría potenciar aún más esta sinergia.

## 1.2 Justificación del proyecto

La justificación para el desarrollo de Digibot radica en su potencial para democratizar la programación y control de robots industriales. Al proporcionar una interfaz de realidad virtual intuitiva y accesible, se espera eliminar las barreras técnicas que tradicionalmente han limitado la operación de estos sistemas a expertos en programación e ingeniería.

Este enfoque innovador no solo promete reducir significativamente el tiempo y recursos necesarios para la capacitación de personal, sino que también ofrece una mayor flexibilidad y adaptabilidad en los entornos de producción. La expectativa es que, al simplificar la interacción con robots industriales, las empresas puedan mejorar su eficiencia operativa, reducir costos y responder más rápidamente a las necesidades cambiantes del mercado.

## 1.3 Objetivos del proyecto

El objetivo principal de Digibot es evolucionar la interfaz humana-robot en el contexto industrial, facilitando una colaboración más estrecha y eficiente a través de la adopción de tecnologías de vanguardia como la realidad virtual, la visión y la inteligencia artificiales. Este ambicioso objetivo se desglosa en varios objetivos específicos como se enumera a continuación:

- Evaluar técnicas de reconocimiento de objetos de cualquier geometría y en cualquier disposición espacial, en un plano, mediante entrenamiento de redes neuronales.
- Desarrollar una aplicación para la identificación, mediante visión artificial, de una cantidad limitada de objetos diferentes en cualquier disposición espacial.
- Implementar la aplicación anterior en el control de un robot para la recogida selectiva de objetos, en disposición aleatoria sobre un plano.
- Desarrollar una interfaz que permita realizar simulaciones de manejo del robot, utilizando RV.

A lo largo de este documento se desarrollará el trabajo realizado durante la última anualidad, en el que se ha cumplimentado el último objetivo específico, proveyendo al sistema Digibot con una interfaz de realidad virtual para el manejo y creación de simulaciones del robot.



## 1.4 Alcance del proyecto

El alcance de Digibot está cuidadosamente delimitado para asegurar la consecución de sus objetivos dentro de los límites tecnológicos y temporales establecidos. Utilizando Unity, se ha creado un entorno 3D inmersivo que no solo facilita la simulación de escenarios de trabajo realistas, sino que también permite la interacción directa con los modelos de robots. Se muestra en la **Ilustración 2** el logo de Unity.



*Ilustración 2 - Logo de Unity*

La integración de estos elementos en una plataforma de RV ofrece una herramienta poderosa para la capacitación y el desarrollo de habilidades en programación robótica, sin los riesgos o costos asociados con la manipulación de equipos reales. Además, el proyecto ha logrado desarrollar un sistema de generación de código que traduce las operaciones simuladas en instrucciones ejecutables por robots reales, superando así uno de los principales desafíos en la programación robótica.

## 2. Marco teórico

El desarrollo de "Digibot", una interfaz de realidad virtual para el control y programación de robots industriales se sitúa en la intersección de varias disciplinas y campos de estudio. Este marco teórico aborda las bases conceptuales y tecnológicas sobre las que se fundamenta el proyecto, ofreciendo una comprensión profunda de los principios de la robótica industrial, la realidad virtual (RV), la visión artificial y la interacción humano-robot (HRI). La integración de estas tecnologías subyace a la innovación que Digibot pretende aportar al ámbito industrial.

### 2.1 Robótica Industrial

La robótica industrial abarca el estudio, diseño, y aplicación de robots para la fabricación y producción automatizada. Los robots industriales se han utilizado tradicionalmente para tareas que requieren precisión, repetitividad y velocidad superiores a las humanas. A lo largo de las últimas décadas, la robótica industrial ha evolucionado desde sistemas automatizados simples hasta robots altamente complejos y autónomos, capaces de realizar tareas de gran complejidad con mínima intervención humana. Cabe realizar una distinción clara entre las siguientes categorías: robótica industrial tradicional y robótica industrial colaborativa, a continuación, se desarrollará cada uno de estos tipos.

La **robótica industrial tradicional** se centra en la automatización de procesos de fabricación mediante el uso de robots programados para realizar tareas específicas de manera independiente. Estos robots están diseñados para operar en entornos estructurados con mínima variabilidad, ejecutando operaciones como ensamblaje, soldadura, pintura, y manejo de materiales. La característica definitoria de la robótica industrial tradicional es su capacidad para mejorar la eficiencia y la productividad, reduciendo al mismo tiempo los errores humanos y aumentando la seguridad en el lugar de trabajo. Sin embargo, la rigidez de estos sistemas y su necesidad de entornos controlados limitan su flexibilidad para adaptarse a nuevos procesos o cambios en la producción. Un ejemplo claro de estas limitaciones es la imposibilidad de trabajar en el mismo espacio que los trabajadores humanos, es por esto por lo que en cualquier fábrica con este tipo de robótica se puede observar una barrera física entre personas y robots, tal como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Ilustración 3 - Barreras físicas en los robots tradicionales  
Fuente: Coches.com



*Ilustración 4 - Usuario trabaja junto con un robot colaborativo.*

*Fuente: Elaboración propia*

Por otro lado, la **robótica industrial colaborativa** representa una evolución hacia sistemas más flexibles y adaptativos, diseñados para trabajar junto a los humanos en un mismo espacio sin barreras físicas. Estos robots colaborativos, o "cobots", están equipados con sensores avanzados y sistemas de visión artificial que les permiten detectar y responder a la presencia humana, asegurando la seguridad y la cooperación en tareas compartidas. La robótica colaborativa destaca por su capacidad para asistir a los trabajadores en tareas que requieren precisión, flexibilidad y toma de decisiones en tiempo real, fomentando un entorno de trabajo más integrador y dinámico, tal como se puede apreciar en la Ilustración 4. Esta categoría de robótica industrial se ha convertido en un campo de rápido crecimiento, impulsado por la demanda de procesos de manufactura más versátiles y personalizados.

La transición de la robótica industrial tradicional a la colaborativa subraya un cambio fundamental en la manera en que concebimos la automatización y la interacción entre humanos y máquinas. Mientras que la primera se enfoca en la eficiencia y la consistencia de procesos aislados, la segunda busca complementar y expandir las capacidades humanas, creando un paradigma en el que la colaboración y la adaptabilidad son claves. Este cambio no solo refleja avances tecnológicos sino también un nuevo enfoque en el diseño de sistemas de trabajo, donde la tecnología se adapta a las necesidades humanas y mejora la calidad de la interacción humano-robot. La integración de estas dos vertientes de la robótica industrial es fundamental para el desarrollo de soluciones innovadoras como Digibot, que busca armonizar la precisión y eficacia de la robótica con la intuición y flexibilidad humanas en entornos industriales.

## 2.2 Realidad extendida

El concepto de la realidad extendida, muchas veces abreviado como XR, nace para englobar las distintas tecnologías a las que se puede acceder mediante sistemas de computación que se integren con la visión humana. En particular, destacan la realidad aumentada, la realidad mixta y la realidad virtual que se desarrollan a continuación.

La **realidad aumentada (RA)** es una tecnología que superpone información digital al mundo físico. A través de dispositivos como smartphones, tabletas o gafas especializadas, los usuarios pueden ver objetos virtuales y datos superpuestos sobre su entorno real. Esta integración de elementos virtuales con el mundo real amplía la percepción y la interacción del usuario con su entorno, ofreciendo aplicaciones prácticas en sectores como la educación, el mantenimiento industrial y el comercio electrónico. La RA proporciona una herramienta valiosa para la formación y la asistencia en tiempo real, permitiendo a los usuarios acceder a información detallada y guías visuales sin desviar la atención de la tarea física que están realizando.

En contraste, la **realidad virtual (RV)** crea un entorno completamente inmersivo que aísla al usuario del mundo físico. Utilizando dispositivos específicos de RV, los usuarios son transportados a espacios tridimensionales diseñados y generados por entornos 3D de ordenador, donde pueden interactuar con entornos y objetos virtuales, tal como se muestra en la **Ilustración 5**. Esta

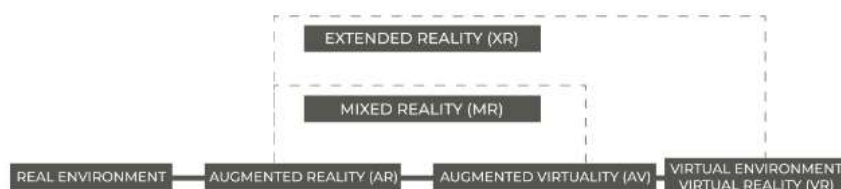


*Ilustración 5 - Entorno completamente inmersivo en la realidad virtual  
Fuente: TrustedReviews*

tecnología se ha aplicado extensamente en la simulación de entrenamiento, la planificación arquitectónica, el entretenimiento y, como es el caso de Digibot, en la programación y control de robots industriales. La RV ofrece un entorno controlado y seguro para simular situaciones complejas o peligrosas, permitiendo a los usuarios adquirir habilidades y experimentar con configuraciones sin los riesgos asociados a la práctica en el mundo real.

La **realidad mixta (RM)**, por su parte, combina elementos de la realidad aumentada y la realidad virtual para crear experiencias donde objetos físicos y digitales coexisten e interactúan en tiempo real. Mediante el uso de dispositivos avanzados, como los sistemas de visión por computadora y los visores de RM, los usuarios pueden manipular objetos virtuales con precisión en su espacio físico, creando un híbrido entre el mundo real y el virtual. La RM se está explorando activamente en campos como la educación, donde puede proporcionar experiencias de aprendizaje envolventes, y en la industria, donde facilita la colaboración remota y la visualización de maquinaria y procesos industriales de manera intuitiva.

La convergencia de estas tecnologías bajo el paraguas de la **realidad extendida (XR)** ofrece un potencial sin precedentes para transformar la forma en que interactuamos con la información y nuestro entorno. La XR no solo mejora la percepción sensorial del usuario, sino que también abre nuevas vías para la interacción humano-computadora, ofreciendo interfaces más naturales, intuitivas y eficaces. En el contexto de la robótica industrial, la XR puede revolucionar la forma en que diseñamos, operamos y mantenemos sistemas robóticos, proporcionando herramientas poderosas para la simulación, la formación y el control remoto de robots, alineando así la tecnología más avanzada con las necesidades y capacidades humanas. En la siguiente ilustración se puede ver un esquema de estas tecnologías.



*Ilustración 6 - Esquema de la realidad extendida*  
Fuente: (De Moura Costa, Roberto Petry, & Paulo Moreira, 2022)

## 2.3 Visión Artificial

La visión artificial se refiere a la capacidad de los sistemas informáticos para interpretar y procesar imágenes del mundo real de manera que sea significativa para las aplicaciones. En la robótica, la visión artificial es fundamental para tareas como la identificación de objetos, la navegación y la realización de operaciones precisas. Este segmento aborda los principios de la visión artificial, incluyendo el procesamiento de imágenes, el reconocimiento de patrones y las técnicas de aprendizaje automático aplicadas para interpretar el entorno visual. La integración de la visión artificial en Digibot permite a los robots identificar y manipular objetos con una precisión imposible de obtener con otras técnicas, mejorando significativamente la eficiencia y la flexibilidad de los procesos industriales.

El **procesamiento de imágenes** es un componente clave de la visión artificial, que implica la conversión de imágenes del mundo real en formatos digitales para su análisis. A través de técnicas como la segmentación de imágenes, la detección de bordes y el filtrado, los sistemas de visión artificial pueden destacar características importantes y reducir la cantidad de datos no esenciales. Este procesamiento preliminar es esencial para preparar las imágenes para etapas de análisis más complejas, permitiendo a los sistemas distinguir objetos, formas y patrones específicos dentro de un entorno.

El **reconocimiento de patrones** es otro aspecto fundamental de la visión artificial, permitiendo a los sistemas identificar objetos y características dentro de las imágenes procesadas. Mediante el uso de algoritmos de clasificación y técnicas de aprendizaje automático, los sistemas pueden aprender a reconocer patrones y objetos basándose en ejemplos previos y características definidas. Esta capacidad es crucial para la robótica industrial, ya que permite a los robots identificar y clasificar objetos en tiempo real, facilitando tareas como el ensamblaje, la inspección de calidad y la logística.

Las **técnicas de aprendizaje automático** aplicadas a la visión artificial han experimentado un avance significativo en los últimos años, impulsadas por el desarrollo de redes neuronales convolucionales (CNN) y sistemas de inteligencia artificial. Estos avances han mejorado la capacidad de los sistemas para interpretar imágenes complejas y realizar tareas de visión artificial con una precisión y una eficiencia sin precedentes.

## 2.4 Interacción Humano-Robot (HRI)

La interacción humano-robot estudia cómo las personas y los robots pueden interactuar de manera efectiva y segura. Este campo es crucial para el desarrollo de sistemas robóticos colaborativos y accesibles en entornos industriales. Se discuten los aspectos ergonómicos, psicológicos y sociales de la HRI, así como las interfaces de usuario y los métodos de comunicación entre humanos y robots. El desarrollo de Digibot implica la creación de interfaces intuitivas que faciliten la programación y control de robots por parte de usuarios sin experiencia en programación, representando un avance significativo en la democratización de la tecnología robótica.

## 2.5 Síntesis de la Integración Tecnológica

Digibot representa la confluencia de estas áreas tecnológicas, marcando un hito en el campo de la robótica industrial. La integración de la realidad virtual con la robótica industrial, potenciada por avances en visión artificial y enfocada en mejorar la interacción humano-robot, establece un nuevo paradigma en la manera en que interactuamos y aprovechamos la robótica en la industria. Este marco teórico no solo proporciona el contexto necesario para comprender el alcance y las implicaciones del proyecto, sino que también subraya el potencial transformador de Digibot en la revolución industrial 4.0.

### 3. Revisión del estado del arte

Esta sección pretende ofrecer una visión comprehensiva sobre los avances recientes, estudios de caso relevantes, tecnologías emergentes, así como brechas y oportunidades identificadas en estos campos. Se inicia con una exploración de los progresos más significativos en el uso de la RV aplicada a la robótica industrial, evidenciando cómo estas innovaciones han facilitado nuevas formas de interacción y programación de robots colaborativos en entornos de fábrica. A continuación, se presentan estudios de caso que destacan implementaciones exitosas y las lecciones aprendidas de estas experiencias. Posteriormente, se examinan las tecnologías emergentes que prometen impulsar aún más la integración de la RV en la robótica, abriendo nuevas posibilidades para el diseño y control de soluciones robóticas. Finalmente, se identifican las principales brechas en la literatura y las oportunidades de investigación que surgen de la necesidad de desarrollar interfaces más intuitivas y accesibles para usuarios no expertos en programación robótica. Este análisis detallado no solo subraya el estado actual del arte, sino que también establece el punto en el que se encuentra el desarrollo de DIGIBOT.

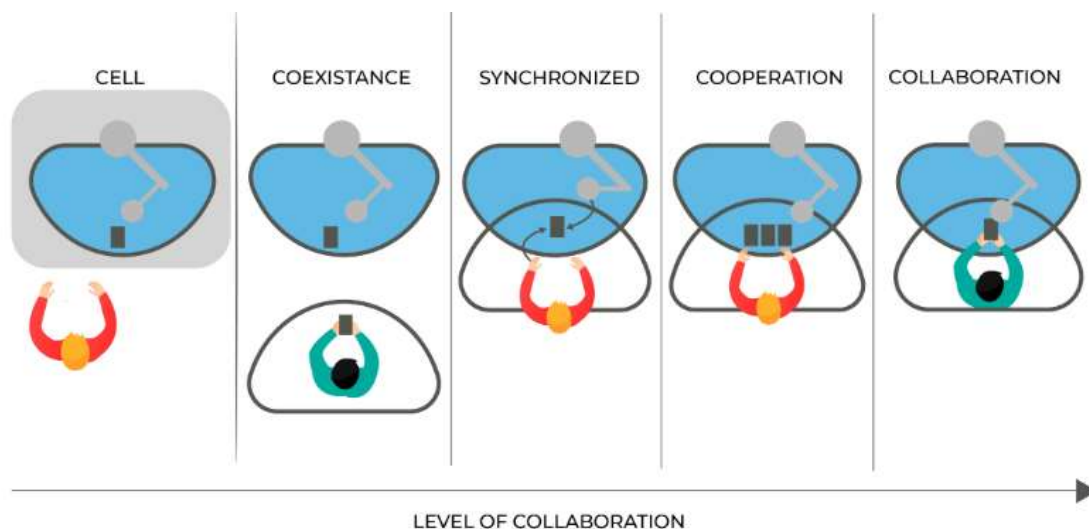
#### 3.1 Avances recientes en RV y robótica para industria

En el contexto de la evolución hacia la Industria 4.0 y la anticipada revolución social Sociedad 5.0, se destaca un esfuerzo concertado por transformar la producción industrial mediante la integración de tecnologías digitales. Innovaciones en inteligencia artificial (IA), realidad virtual y aumentada (RV/RA), Internet de las Cosas (IoT), automatización, 5G y robótica están liderando esta transformación. La progresión en algoritmos innovadores, recursos computacionales y la abundancia de big data industrial, fruto de la digitalización creciente de sistemas, procesos e interacciones, ha marcado el inicio de una era transformadora en la aplicación de estas tecnologías clave. La informática industrial, situada en la intersección de estas tecnologías y la manufactura, ofrece oportunidades para desarrollar sistemas sofisticados para la planificación y gestión de procesos manufactureros. Además, tecnologías inmersivas como la RV y la RA abren nuevas vías para mejorar las operaciones facilitando la colaboración humano-máquina, mientras que los robots móviles se vuelven más versátiles y capaces de trabajar al lado de operadores humanos.

Los sistemas ciberfísicos industriales modernos, caracterizados por una integración extensa de sensores y actuadores en ubicaciones geográficamente dispersas, requieren monitoreo y control distribuido en tiempo real. Sin embargo, desafíos surgidos por la dispersión geográfica que afecta la detección, control y optimización distribuidos, así como limitaciones en comunicación relacionadas con vulnerabilidades de seguridad, ancho de banda y problemas de accesibilidad a la red, impactan el rendimiento del sistema. Esto hace necesaria la integración de tecnologías de aprendizaje automático para enfrentar estos desafíos de manera efectiva. La sinergia entre el gemelo digital y el IoT es crítica para aprovechar la información efectivamente sin comprometer la seguridad. Mientras el IoT constituye la columna vertebral, un gemelo digital representa

una réplica virtual en tiempo real de un objeto o sistema, utilizando razonamiento, simulación y aprendizaje automático para análisis integrales.

En el ámbito de la robótica industrial, las soluciones colaborativas emergen como una nueva frontera, permitiendo el intercambio fluido de habilidades entre trabajadores humanos y robots, aprovechando las fortalezas de ambos. A pesar del enorme potencial, lograr una colaboración humano-robot eficiente requiere abordar desafíos relacionados con interacciones seguras, interfaces de usuario intuitivas y programación eficiente. La investigación se centra en la colaboración humano-robot en entornos industriales, abordando problemas de interacción física y cognitiva, presentando soluciones disponibles, discutiendo aplicaciones industriales clave y destacando áreas para el desarrollo futuro. Estos avances y desafíos subrayan la necesidad de seguir explorando y desarrollando tecnologías que faciliten una mayor integración y eficiencia en la producción industrial, enfatizando la importancia de la investigación continua para superar las barreras existentes y maximizar el potencial de estas tecnologías emergentes. (Mourtzis, Razvan, Godina, & Smalcerz, 2023). En la ilustración se pueden ver los distintos posibles niveles de colaboración robot – humano.



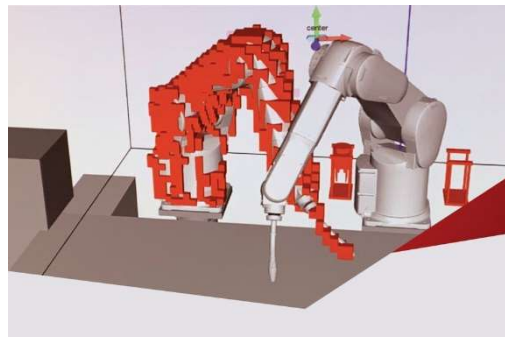
*Ilustración 7 - Niveles de colaboración trabajador-robot.  
Fuente: (De Moura Costa, Roberto Petry, & Paulo Moreira, 2022)*

### 3.2 Estudios de caso relevantes

Se identifica a la empresa Realtime Robotics como un referente innovador en el ámbito de la automatización robótica. La compañía, dirigida por el CEO Peter Howard, aborda el desafío del retorno de inversión en la industria robótica. Howard destaca que, a pesar de la capacidad de la automatización robótica para ejecutar casi cualquier tarea humana, el alto costo de implementación y la baja eficiencia de rendimiento han limitado su adopción.



Realtime Robotics responde a esta problemática mediante el desarrollo de una solución integrada de software y hardware propietario, la cual logra reducir significativamente el tiempo y costos de implementación de sistemas robóticos industriales. La innovación clave de la compañía radica en su capacidad para simplificar la programación de robots, logrando reducciones de hasta un 90% en el componente de programación. Esta eficiencia se traduce en una adopción de robots más



*Ilustración 8 - Sistema de programación de Realtime Robotics  
(Fuente: MIT News)*

justificable desde el punto de vista de la inversión, posicionando a la tecnología de Realtime Robotics como un avance crucial en el campo de la robótica industrial.

La planificación de movimiento, un proceso computacional que permite a los robots desplazarse de manera óptima y sin colisiones, es un área donde Realtime Robotics ha establecido un nuevo estándar. La compañía ha superado los enfoques tradicionales basados en software rígido, implementando una plataforma que facilita la planificación de movimiento autónomo y la coordinación entre múltiples robots. Esta plataforma se basa en la investigación de George Konidaris, cofundador de la empresa, y se materializa a través del Realtime Controller, un PC industrial que precomputa y selecciona en tiempo real entre millones de movimientos potenciales. La integración de inteligencia artificial para la optimización de múltiples robots y la incorporación de tecnologías de percepción espacial y de objetos, realzan la flexibilidad y seguridad de los sistemas robóticos en entornos industriales compartidos con humanos. Estas innovaciones de Realtime Robotics marcan un hito en la planificación de movimiento y la interacción humano-robot, contribuyendo significativamente al avance de la robótica industrial hacia entornos de producción más dinámicos y eficientes. (Wolff, 2021)

### 3.3 Tecnologías emergentes en RV y robótica: fabricación personalizada

La transición hacia la Industria 4.0 ha impulsado un paradigma de producción personalizada que permite a los clientes solicitar productos únicos, especificando sus propias características. Este enfoque desafía las líneas de producción tradicionales, secuenciales y estandarizadas, destacando la necesidad de alta productividad y flujo de producto, pero no satisface completamente las demandas personalizadas actuales de los consumidores. La industria enfrenta el desafío de adaptarse a este nuevo paradigma, requiriendo un alto nivel de flexibilidad en la producción, descentralización de la toma de decisiones y un uso inteligente de los recursos disponibles para permitir la producción masiva personalizada sin incrementar significativamente los costos de producción.

La automatización industrial y los sistemas robóticos tradicionales por sí solos ya no son suficientes para cumplir con estos nuevos requisitos. Surge así la necesidad de integrar

nuevas tecnologías, como los robots colaborativos y la realidad aumentada, y conceptos como la colaboración humano-robot y el operador inteligente (Operador 4.0), para mantener niveles altos de producción sin disminuir la calidad del producto. Las combinaciones de humanos y máquinas, aprovechando sus fortalezas complementarias, sugieren un sistema ideal donde humanos y robots colaboran para lograr objetivos comunes, mejorando la ergonomía del operador, reduciendo la carga cognitiva y haciendo un mejor uso de los recursos disponibles.

Los robots colaborativos, diseñados para interactuar directamente con humanos dentro de un espacio de trabajo compartido, son una respuesta a la necesidad de una interacción humana-robot segura y eficiente. La realidad aumentada (AR), por otro lado, se perfila como una herramienta prometedora para mejorar la comprensión del operador sobre las intenciones del robot y facilitar su interacción, aplicable en una variedad de campos como la guía de ensamblaje y la visualización de datos. Sin embargo, la implementación de la AR aún enfrenta desafíos relacionados con factores de hardware, software, y su integración en sistemas de planificación de recursos empresariales y sistemas de ejecución de manufactura. A pesar de estos desafíos, la AR demuestra su potencial para mejorar la seguridad y eficiencia del operador, acelerar la ejecución de actividades, disminuir el índice de errores, y reducir la carga mental, evidenciando su promesa para facilitar una cooperación efectiva entre humanos y robots en la línea de producción. (De Moura Costa, Roberto Petry, & Paulo Moreira, 2022)

### 3.4 Brechas y oportunidades identificadas

A pesar de los avances significativos en la integración de la realidad virtual (RV) y la robótica en el sector industrial, existen varias brechas que limitan la adopción y el desarrollo óptimo de estas tecnologías. Una de las principales brechas identificadas es la falta de interfaces de usuario intuitivas y accesibles para programadores no expertos. Actualmente, la complejidad en la programación de robots y la interacción con sistemas de realidad virtual requiere de conocimientos especializados, lo que limita su accesibilidad a un grupo reducido de usuarios con formación técnica avanzada. Esta brecha representa una barrera significativa para la implementación a gran escala de soluciones robóticas y de RV en entornos industriales, donde la facilidad de uso y la rapidez en la adaptación son clave para su éxito.

Otra brecha importante es la necesidad de mejorar la seguridad y la ergonomía en la colaboración humano-robot. Aunque se han logrado avances en robots colaborativos diseñados para trabajar junto a humanos, persisten desafíos en garantizar interacciones seguras y ergonómicamente óptimas. La seguridad sigue siendo una preocupación central, especialmente en tareas que involucran movimiento rápido o manejo de objetos pesados o peligrosos. Por otro lado, la ergonomía en el diseño de espacios de trabajo compartidos entre humanos y robots necesita mayor atención para prevenir fatiga y lesiones en los operadores, así como para mejorar la eficiencia y satisfacción en el trabajo.

En cuanto a oportunidades, el desarrollo de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial (IA) y los sistemas de percepción avanzada abre nuevas posibilidades para superar estas brechas. La integración de IA en la programación de robots y sistemas de RV puede facilitar interfaces de usuario más intuitivas, permitiendo una programación y control más naturales y accesibles para usuarios sin experiencia previa en robótica. Además, la IA puede jugar un papel crucial en la mejora de la seguridad y la ergonomía en la colaboración humano-robot, mediante sistemas que anticipan y adaptan las acciones de los robots a las necesidades y movimientos de los operadores humanos, creando entornos de trabajo más seguros y confortables.

Finalmente, la colaboración entre industria, academia y desarrolladores de tecnología es fundamental para abordar estas brechas. La investigación aplicada, el desarrollo de normativas específicas para la implementación segura de estas tecnologías y la formación de los trabajadores en nuevas habilidades son esenciales para aprovechar plenamente las oportunidades que la RV y la robótica ofrecen para la industria. Asimismo, incentivar la inversión en I+D y promover espacios de prueba y experimentación pueden acelerar la integración efectiva de estas tecnologías en la producción industrial, marcando el camino hacia una industria más flexible, eficiente y adaptada a los desafíos del futuro.

## 4. Desarrollo del proyecto

En esta sección se expone la metodología utilizada para llevar a cabo el desarrollo del proyecto. Se comenzará explicando las distintas tecnologías que permiten el desarrollo de este sistema y se explicarán las tecnologías seleccionadas. Después, se expondrá el proceso de desarrollo, así como los obstáculos que se han tenido que sortear y las técnicas elegidas para esto, por último, se expondrá una visión general de la solución obtenida.

### 4.1. Posibles tecnologías para el desarrollo

Para este apartado, es indispensable distinguir entre 3 aspectos del proyecto: el sistema de realidad virtual, el entorno de desarrollo 3D y el sistema de robótica colaborativa.

#### 4.1.1 Sistema de realidad virtual

En la selección de herramientas tecnológicas para el desarrollo de sistemas de programación de robots mediante interfaces de realidad virtual, es fundamental evaluar cuidadosamente las opciones de hardware disponibles. Entre las más destacadas se encuentran el Meta Quest 2, Valve Index, HTC Vive y Apple Vision Pro. A continuación, se describen estas tecnologías, destacando sus ventajas y desventajas para el proyecto en cuestión.

##### *Meta Quest 2*

Las gafas Meta Quest 2 (anteriormente conocido como Oculus Quest 2) son un sistema de realidad virtual autónomo producido por Meta Platforms (anteriormente Facebook Inc.). Fue lanzado en octubre de 2020 como sucesor del Oculus Quest.



*Ilustración 9 - Gafas Meta Quest 2  
Fuente: (Meta Platforms, 2023)*

La empresa Facebook Inc. cambió su nombre a Meta debido a su cambio de tendencia en el desarrollo de un sistema de realidad virtual accesible que pueda llegar a sustituir

los sistemas de computación actuales. Para este fin destaca, entre otros, la compra de la empresa Oculus centra en el diseño y manufactura de sistemas avanzados de realidad virtual.

Su desarrollo se centró en ofrecer una experiencia de realidad virtual inmersiva sin la necesidad de cables o un PC potente, gracias a su procesador integrado.

#### Ventajas para el Proyecto:

- **Autonomía:** Al ser un dispositivo autónomo, no requiere de un PC externo, lo que facilita su integración en diferentes entornos de trabajo.
- **Facilidad de Uso:** Su configuración y manejo sencillos permiten una rápida adopción por parte de los usuarios, reduciendo los tiempos de capacitación.
- **Accesibilidad:** Tiene un precio relativamente accesible en comparación con otros sistemas de realidad virtual, lo que facilita su adopción en entornos de trabajo con robots.

#### Desventajas para el Proyecto:

- **Rendimiento Limitado:** Al ser autónomo, su poder de procesamiento es inferior al de sistemas que se apoyan en PC, lo que podría limitar la complejidad de las simulaciones.
- **Ecosistema Cerrado:** El control por parte de Meta sobre el software y el hardware puede limitar la personalización y la integración con herramientas de terceros.

#### Valve Index

Valve Index, presentado como un sistema de realidad virtual de alta gama, hizo su debut en el mercado en junio de 2019, bajo el auspicio de Valve Corporation. Este dispositivo fue meticulosamente desarrollado con una meta clara en mente: proporcionar una experiencia sin paralelos en términos de calidad visual y precisión de seguimiento dentro del ámbito de la realidad virtual. Diseñado para satisfacer las altas expectativas de los entusiastas de la VR y los profesionales que buscan una inmersión y una interactividad de última generación, el Valve Index se distingue por su capacidad para entregar imágenes extremadamente nítidas y un seguimiento de movimiento con grandes niveles de precisión.



Ilustración 10 - Valve Index  
Fuente: (Valve Inc., 2022)

Su lanzamiento no solo marcó un hito significativo en la evolución de la tecnología de realidad virtual, sino que también estableció nuevos estándares de lo que los usuarios

pueden esperar en términos de calidad y rendimiento. Con un enfoque en mejorar significativamente la experiencia de usuario, Valve Index apunta a una audiencia que valora profundamente la inmersión y la precisión, ofreciendo así una plataforma robusta para aplicaciones de VR tanto recreativas como profesionales.

**Ventajas para el Proyecto:**

- **Calidad de imagen:** Ofrece una de las mejores experiencias visuales del mercado gracias a sus pantallas de alta resolución y tasa de refresco.
- **Precisión en el seguimiento:** Su sistema de seguimiento Lighthouse es altamente preciso, lo que es crucial para aplicaciones de programación de robots que requieren gran exactitud.
- **Ergonomía y confort:** Diseñado para sesiones prolongadas de uso, lo que beneficia a los usuarios que trabajan durante largos periodos.

**Desventajas para el Proyecto:**

- **Coste elevado:** Su precio es significativamente mayor en comparación con otras opciones, lo que podría ser un factor limitante.
- **Necesidad de un PC potente:** Requiere de un computador con especificaciones altas para funcionar, lo que añade un costo adicional y limita su movilidad.

*HTC Vive*

HTC Vive es un sistema de realidad virtual lanzado en abril de 2016, fruto de la colaboración entre HTC y Valve Corporation. Se diseñó con el objetivo de ofrecer una experiencia de VR inmersiva y completa, con énfasis en el seguimiento de movimiento y la interactividad.

**Ventajas para el Proyecto:**

- **Seguimiento de Área Completa:** Con la tecnología SteamVR Tracking, ofrece un seguimiento preciso en un espacio amplio, ideal para simulaciones que requieren libertad de movimiento.
- **Soporte y Ecosistema Amplio:** Tiene un gran soporte de aplicaciones y herramientas de desarrollo gracias a su asociación con Valve y su acceso al SteamVR.
- **Flexibilidad de Uso:** Compatible con una amplia gama de accesorios y actualizaciones, lo que permite adaptar el sistema a las necesidades específicas del proyecto.

**Desventajas para el Proyecto:**

- **Dependencia de Hardware Externo:** Al igual que el Valve Index, necesita de un PC de alta gama para funcionar.
- **Costo Inicial y de Mantenimiento:** La inversión inicial y el costo de accesorios o actualizaciones pueden ser elevados.

#### *Apple Vision Pro*

El Apple Vision Pro es un sistema de realidad virtual y aumentada anunciado recientemente por Apple Inc. Aunque Apple ha mantenido en secreto muchos detalles, se sabe que su enfoque está en ofrecer experiencias de alta calidad tanto en VR como en AR, con un énfasis particular en la integración con el ecosistema de productos y servicios de Apple.

Si bien no es factible para el proyecto ya que aún no están disponibles para su compra, resulta relevante destacarla debido a la capacidad de Apple de marcar tendencias de mercado.



*Ilustración 11 - Mujer utiliza la Apple Vision Pro.  
Fuente: Apple*

#### **Ventajas para el Proyecto:**

- **Integración con Ecosistema Apple:** Para proyectos que ya utilizan tecnología de Apple, la integración con el Vision Pro podría ser fluida y eficiente.
- **Innovación y Calidad:** Se espera que ofrezca innovaciones en términos de interacción y calidad de imagen, aprovechando la experiencia de Apple en diseño y tecnología de hardware.

#### **Desventajas para el Proyecto:**

- **Precio y Accesibilidad:** Basándose en el historial de precios de Apple, es probable que el Vision Pro sea una de las opciones más costosas.
- **Compatibilidad Limitada:** La integración con herramientas y plataformas fuera del ecosistema de Apple podría presentar desafíos insalvables.

#### *Sistema seleccionado*

Para este proyecto, se ha seleccionado las gafas Meta Quest 2, debido a su precio, su portabilidad y la accesibilidad para desarrollar en su plataforma.

#### **4.1.2 Entorno de desarrollo 3D**

La elección de un entorno de desarrollo es una decisión crucial para el proyecto. Dos de las plataformas más potentes y versátiles disponibles son Unity y Unreal Engine. A continuación, se detalla una descripción más amplia de cada uno, incluyendo sus

características, ventajas y desventajas, para proporcionar una base sólida para la selección.

### Unity

Unity es un entorno de desarrollo integrado (IDE) y motor de juego que fue lanzado por Unity Technologies en 2005. Originalmente diseñado para desarrollar juegos de ordenador, Unity ha evolucionado para soportar una amplia gama de aplicaciones, incluidas las experiencias de realidad virtual (VR) y realidad aumentada (AR). Su flexibilidad, facilidad de uso y compatibilidad multiplataforma lo han convertido en uno de los motores de juego más populares entre desarrolladores de todos los niveles, desde principiantes hasta grandes estudios.

#### Ventajas para el Proyecto:

- **Compatibilidad Extensa:** Unity soporta más de 25 plataformas, incluyendo PC, consolas, móviles y, por supuesto, los principales dispositivos de realidad virtual, lo que lo hace excepcionalmente versátil para el desarrollo de proyectos de VR.
- **Gran Comunidad y Amplios Recursos:** Cuenta con una comunidad global activa y una abundante disponibilidad de recursos de aprendizaje, assets y plugins, facilitando la resolución de problemas y la innovación.
- **Interfaz Intuitiva y Lenguaje de Scripting Accesible:** Su entorno de desarrollo y el uso de C# para scripting hacen que Unity sea accesible para desarrolladores con diferentes niveles de habilidad técnica, desde principiantes hasta expertos.
- **Modelo de Precios Flexible:** Unity ofrece una versión gratuita (Personal) para desarrolladores individuales y pequeñas empresas, y versiones de suscripción (Plus, Pro) con más características para estudios más grandes y proyectos comerciales.
- **Disponibilidad de conocimiento:** Debido a la previa utilización de Unity en diversos proyectos, los técnicos de AIDIMME ya tienen conocimientos en esta plataforma, lo que elimina la necesidad de largos periodos de formación.

#### Desventajas para el Proyecto:

- **Desafíos en la Optimización para Proyectos de Alta Demanda:** Aunque Unity es capaz de producir gráficos de alta calidad, los proyectos más exigentes en términos de gráficos y rendimiento pueden requerir optimización y conocimientos técnicos avanzados para alcanzar los resultados deseados.
- **Curva de Aprendizaje Inicial:** A pesar de su accesibilidad, los desarrolladores nuevos en Unity o en el desarrollo de juegos pueden enfrentar una curva de aprendizaje al comenzar, especialmente en proyectos complejos de VR.

### Unreal Engine

Desarrollado por Epic Games, Unreal Engine es un motor de juego completo y avanzado conocido por su impresionante calidad gráfica y su potente arquitectura. Lanzado por



primera vez en 1998, ha sido utilizado en una amplia gama de juegos y aplicaciones, desde títulos independientes hasta algunos de los juegos más visualmente impresionantes del mercado. Unreal Engine es particularmente reconocido por su sistema de iluminación dinámica, renderizado fotorrealista y robusto sistema de físicas, lo que lo hace una opción popular para proyectos que buscan empujar los límites de la fidelidad visual y la interactividad.

#### Ventajas para el Proyecto:

- **Calidad Visual Excepcional:** Con capacidades avanzadas de renderizado y gráficos, Unreal Engine es ideal para proyectos de VR que buscan una inmersión visual profunda y realismo.
- **Blueprints:** Su sistema de scripting visual permite a los desarrolladores y diseñadores crear lógica de juego compleja sin escribir código tradicional, lo que puede acelerar significativamente el desarrollo y facilitar la colaboración entre equipos multidisciplinares.
- **Soporte Integral para VR:** Unreal Engine ofrece soporte específico y optimizado para el desarrollo de VR, incluyendo herramientas y templates que simplifican la creación de entornos inmersivos y experiencias interactivas.
- **Modelo de Licencia Basado en Royalties:** Permite a los desarrolladores utilizar el motor gratuitamente hasta que el proyecto alcance un cierto nivel de éxito comercial, momento en el cual se aplican royalties. Esto puede ser ventajoso para startups y proyectos con limitaciones presupuestarias iniciales.

#### Desventajas para el Proyecto:

- **Requerimientos de Hardware Más Altos:** Las capacidades avanzadas de Unreal Engine vienen con la contraparte de requerimientos de hardware más exigentes, tanto para el desarrollo como para la ejecución de aplicaciones, lo que puede limitar su uso en equipos menos potentes.
- **Curva de Aprendizaje Más Pronunciada:** Aunque los Blueprints facilitan el acceso a no programadores, dominar todas las funcionalidades de Unreal Engine y aprovechar su potencial completo puede ser más desafiante y requerir una inversión significativa en aprendizaje y experimentación.

#### *Tecnología seleccionada*

Para el proyecto se ha realizado un desarrollo utilizando Unity debido a la capacidad de los técnicos de AIDIMME para trabajar con esta tecnología, los menores requisitos de hardware y la capacidad de adaptación a proyectos de RV/RA. Uno de los factores diferenciadores por su contra de Unreal Engine es la capacidad para crear gráficos altamente realistas que no son una necesidad en este proyecto.

### 4.1.3 Robótica colaborativa

Como proveedor de robótica colaborativa se ha seleccionado Universal Robots debido al alto coste de adquisición de este tipo de sistemas. Los robots UR se han utilizado ya en la primera iteración de Digibot dando buenos resultados por lo que se ha decidido continuar con su utilización en esta segunda parte. Otro aspecto importante a destacar es la propia experiencia y conocimiento que tienen los técnicos de AIDIMME con este sistema, lo que elimina necesidades de formación, y permite un desarrollo más directo.

Es necesario remarcar que, si bien para el desarrollo del proyecto debe seleccionarse algún proveedor sobre el que probar el desarrollo, en un futuro desarrollo sería interesante adaptar el programa generado para un robot UR a otro tipo de robot.



Ilustración 12 - Robot UR.  
Fuente: Universal Robots

## 4.2 Desarrollo del sistema

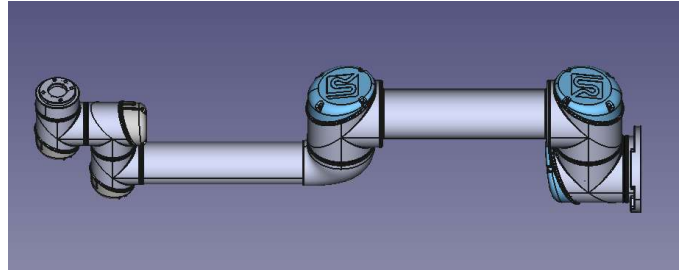
En esta sección se va a exponer cómo se ha llevado a cabo el desarrollo de la aplicación, así como las dificultades que se han encontrado y las estrategias que se han tomado para solucionarlas. Para esto, la sección se divide en 3 puntos, primero se explicará cómo se ha configurado del entorno virtual en Unity de forma que sea ejecutable en un entorno de realidad virtual. Posteriormente, se desarrolla cómo se ha implementado en el entorno creado, el sistema de cinemática inversa. A continuación, se explica cómo se ha desarrollado el sistema de control del robot. Por último, se desarrolla cómo se utiliza Unity para escribir un script de robot que refleje los movimientos definidos por el usuario.

### 4.2.1 Configuración del entorno virtual

El primer paso llevado a cabo fue el desarrollo de un entorno virtual en el que se encuentren todos los elementos necesarios para el funcionamiento de la aplicación.

#### *Modelo de robot 3D*

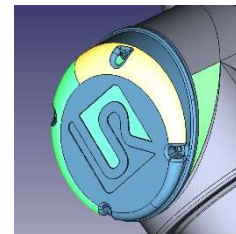
Es necesario desarrollar o modelar un Asset 3D del robot que se va a desarrollar. Convenientemente, Universal robots permite descargar el modelo 3D de ciertos robots, incluyendo el UR5 que se va a utilizar para Digibot. En este caso, UR proporciona un modelo en formato STEP, un formato típico de software de diseño CAD. Podemos utilizar el software FreeCAD para visualizar el asset y verificar que es correcto y se muestra con el detalle necesario. Se puede ver en la siguiente ilustración el asset obtenido:



*Ilustración 13 - Asset 3D del UR5.  
Fuente: Universal Robots y FreeCAD*

Otro UR proporciona este modelado 3D sin herramienta. Se ha incluido, por tanto, un modelo simple de pinza 3D al modelo proporcionado.

El modelo debe ser importado ahora a Unity de forma que las únicas partes móviles sean las propias juntas del robot tales como codos hombros y muñecas. El archivo STEP descargado es una aglomeración de múltiples superficies necesarias para generar el modelo completo, tal como se puede ver en la ilustración adjunta en la que se destacan algunas de las superficies incluidas en el modelo



*Ilustración 14 -  
Superficies en el asset  
3D del UR5.  
Fuente: Obtención  
propia*



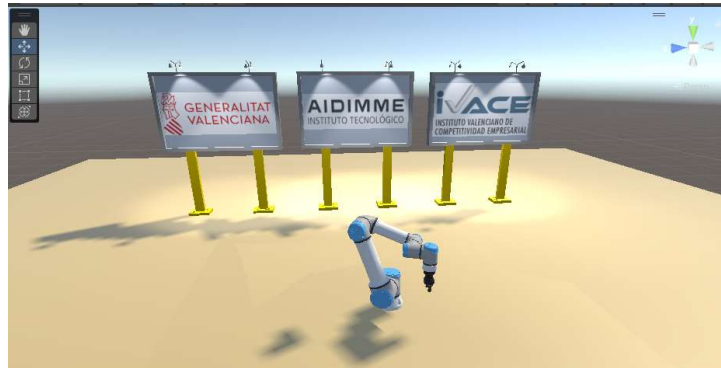
*Ilustración 15 - Integración del  
modelo 3D en Unity.  
Fuente: obtención propia*

en distintos colores. Es por esto por lo que se debe realizar un trabajo para incluirlo en Unity de forma que se fusionen todas las superficies de manera que la única división posible entre ellas sean las articulaciones del robot.

Una vez llevado este trabajo a cabo, se pueden identificar las distintas partes móviles del robot como assets independientes, quedando anidados uno dentro del siguiente para conseguir que su posición se mantenga respecto del elemento anterior y no del general, tal como se muestra en la **Ilustración 15**.

### Entorno virtual

Para que el entorno virtual no aparezca vacío, se ha incluido el robot en un plano que actúa como suelo y base del robot. Además, se han incorporado assets 3D de carteles publicitarios para incluir los logos necesarios, tal como se puede ver en la **Ilustración 16**.



*Ilustración 16 - Entorno 3D del proyecto.  
Fuente: Obtención propia*

Se ha utilizado la Unity Assets Store para obtener los assets 3D necesarios para los carteles y se han incorporado los puntos de luz focal que resalten los logos.

#### *Ajustes de Unity para RV*

Para poder ejecutar aplicaciones de realidad extendida en las Meta Quest 2, es necesario seguir un conjunto de pasos de configuración que se listan a continuación:

1. Creación de cuenta de desarrollador de Meta Quest.
2. Instalación de la Oculus Link App en Windows.
3. Instalación del Oculus Developer Hub en Windows.
4. Activación de modo desarrollador de las gafas.
5. Instalación del plug-in de XR Management.
6. Habilitación de XR para Oculus y OpenXR.
7. Enlace de los Oculus Touch Controllers para Windows y Android.
8. Instalación del XR-Interaction Tool.
9. Instalación de los Sample Assets para el XR-Interaction Tool.
10. Enlace de las acciones y controladores con el gestor del espacio tridimensional.
11. Inicialización del XR-Origin basado en acciones.
12. Inicialización del Oculus Link para testeo.
13. Configuración de la Build del proyecto para sistemas Android.

Todos estos pasos son indispensables tanto para el correcto funcionamiento de la aplicación en las gafas de realidad virtual como para la posibilidad de ejecutar y testear la aplicación sobre las gafas de realidad virtual. Si bien alguno podría ser evitado y permitir generar igualmente la aplicación, sin la posibilidad de testear directamente sobre las gafas, sería casi imposible encontrar y solucionar los posibles problemas de código que puedan aparecer.

#### *4.2.2 Sistema de cinemática inversa*

Para la creación de la simulación del robot en el entorno de realidad virtual, es necesario un sistema que sea capaz de entender y proporcionar de manera simple una solución al problema de encontrar en qué conjunto de ángulos de giro debe encontrarse el conjunto de las articulaciones del brazo robot para llegar exactamente al punto descrito.

Para abordar este problema, aparecen los conceptos de cinemática directa e inversa.

*Cinemática Directa*

La cinemática directa se refiere al proceso de calcular la posición y orientación finales (pose) del efector final de un robot (en el proyecto una pinza) en el espacio, dado un conjunto específico de posiciones angulares de sus articulaciones. En el contexto de un brazo robótico, como el Universal Robots 5, esto implica determinar la ubicación de la herramienta al final del brazo robótico basándose en los ángulos de las articulaciones. Este cálculo es fundamental para predecir el movimiento del robot y su interacción con el entorno.

*Cinemática Inversa*

La cinemática inversa, por otro lado, aborda el problema inverso: dado un punto deseado en el espacio para el efector final, ¿cuáles deben ser los ángulos de las articulaciones del brazo robótico para alcanzar esa posición? Este cálculo es más complejo que la cinemática directa, ya que puede haber múltiples soluciones, o en algunos casos, ninguna. La cinemática inversa es esencial para tareas de planificación de movimiento donde el objetivo es alcanzable pero no se conocen las posiciones de las articulaciones a priori. Para ser capaz de desarrollar un sistema que halle la solución, es necesario disponer de una notación comprensiva y estándar de las características físicas del robot, por esto, se introducen en el siguiente apartado los parámetros de Denavit-Hartenberg.

*Parámetros de Denavit-Hartenberg (DH)*

Los parámetros de Denavit-Hartenberg representan una convención para definir la geometría de los enlaces de un robot. Cada articulación del robot se describe mediante cuatro parámetros DH (Andersen, 2018) donde cada  $i$  representa una articulación:

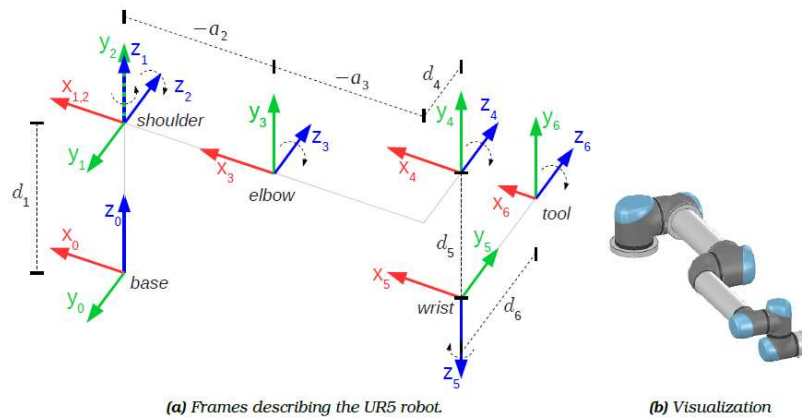
- $a_i$ : Es la distancia de  $Z_i$  a  $Z_{i+1}$  medido a lo largo de  $X_i$
- $\alpha_i$ : Ángulo entre  $Z_i$  y  $Z_{i+1}$  respecto  $X_i$
- $d_i$ : Es la distancia de  $X_{i-1}$  a  $X_i$  medido a lo largo de  $Z_i$
- $\theta_i$ : Ángulo entre  $X_{i-1}$  y  $X_i$  respecto  $Z_i$

Estos parámetros simplifican el proceso de definir la relación espacial entre los enlaces consecutivos de un robot, lo que a su vez facilita el cálculo de la cinemática directa e inversa.

	$a_i(m)$	$\alpha_i(rad)$	$d_i(m)$	$\theta_i$
1	0	$\pi/2$	0.089159	$\theta_1$
2	-0.425	0	0	$\theta_2$
3	-0.39225	0	0	$\theta_3$
4	0	$\pi/2$	0.10915	$\theta_4$
5	0	$-\pi/2$	0.09465	$\theta_5$
6	0	0	0.0823	$\theta_6$

Tabla 1 - Parámetros DH para el UR5

En la tabla anterior (Universal Robots, 2023), se pueden ver los parámetros de Denavit-Hartenberg para el UR5, el objetivo de la cinemática inversa es obtener los valores de  $\theta_1, \dots, \theta_6$ . Se puede ver en la **Ilustración 17** una representación espacial de estos ejes y parámetros:



*Ilustración 17 - Ejes del UR5 y parámetros DH.  
Fuente: (Andersen, 2018)*

La implementación de la cinemática inversa en Unity requiere una comprensión detallada de los parámetros de DH, ya que son fundamentales para modelar la estructura del brazo robótico y realizar los cálculos necesarios. El sistema aprovecha estas definiciones para iterar a través de posibles soluciones de ángulos de articulación, optimizando el camino del efector final hacia su objetivo deseado en el espacio virtual.

#### Implementación en Unity

Para implementar estas técnicas en Unity, se desarrolla un script en C# que calcula la cinemática inversa del Universal Robots 5. El script de C# utiliza algoritmos de cinemática inversa para determinar las posiciones de las articulaciones requeridas para mover el efector final del brazo robótico a una posición y orientación específicas en el espacio. Esto se logra a través del uso de los parámetros de Denavit-Hartenberg para simplificar el problema y facilitar el cálculo de las posiciones de las articulaciones.

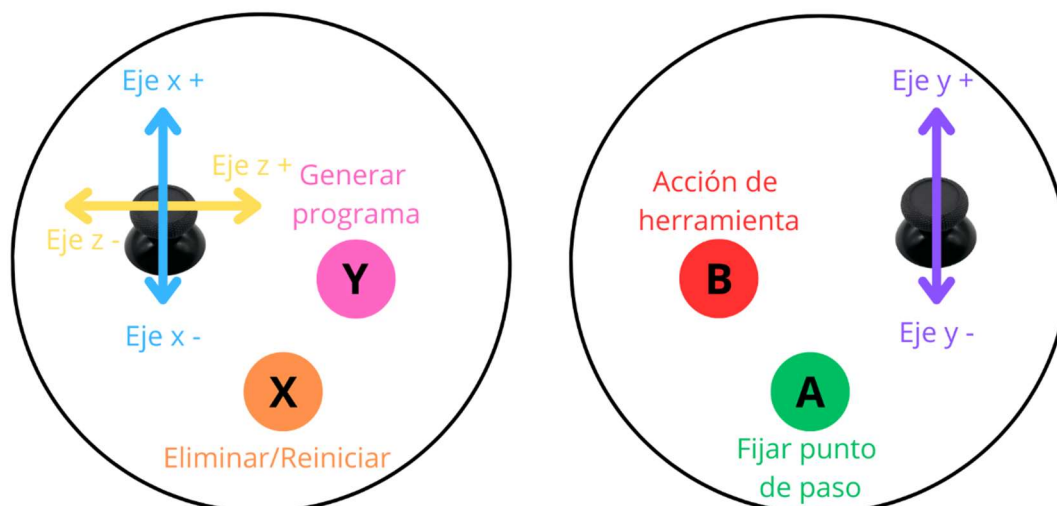
#### 4.2.3 Sistema de control del robot

El sistema de DIGIBOT se vale de los touch controllers de las Meta Quest 2 para proporcionar un sistema entendible y de precisión para el manejo, control y programación del robot. Un script de C# se ocupa de recibir las variaciones en los joysticks y botones y ejecutar las acciones asociadas a cada uno de estos:

- **Stick izquierdo:** Mueve la herramienta del robot en el plano paralelo al suelo.
- **Stick derecho:** Permite cambiar la altura a la que se sitúa la herramienta.
- **Botón A:** Fija un punto de paso del robot y lo muestra en la interfaz de usuario.
- **Botón B:** Fija un punto de acción de herramienta y lo muestra en la interfaz de usuario.
- **Botón X:** Pulsarlo elimina el ultimo punto de paso o de acción, mantenerlo elimina todos los puntos.

- **Botón Y:** Genera un programa de robot con el recorrido actualmente definido.

Se muestra en la **Ilustración 18** la disposición de los controles y su efecto en el modelo 3D:



*Ilustración 18 - Distribución de los mandos y efecto en el modelo 3D.  
Fuente: Elaboración propia.*

Para dar un feedback visual al usuario, el script generará cada vez que se fije un punto de paso, una esfera verde en el espacio, las distintas esferas definirán el camino que debe recorrer el robot, para hacerlo más visual, estas esferas se unen mediante un cilindro fino haciendo posible previsualizar el camino a recorrer por el robot. Por último, al fijar un punto de acción de herramienta, se creará en ese punto un cubo rojo que marcará dónde se va a ejecutar la acción.

#### 4.2.4 Generación del script de robot compatible con UR

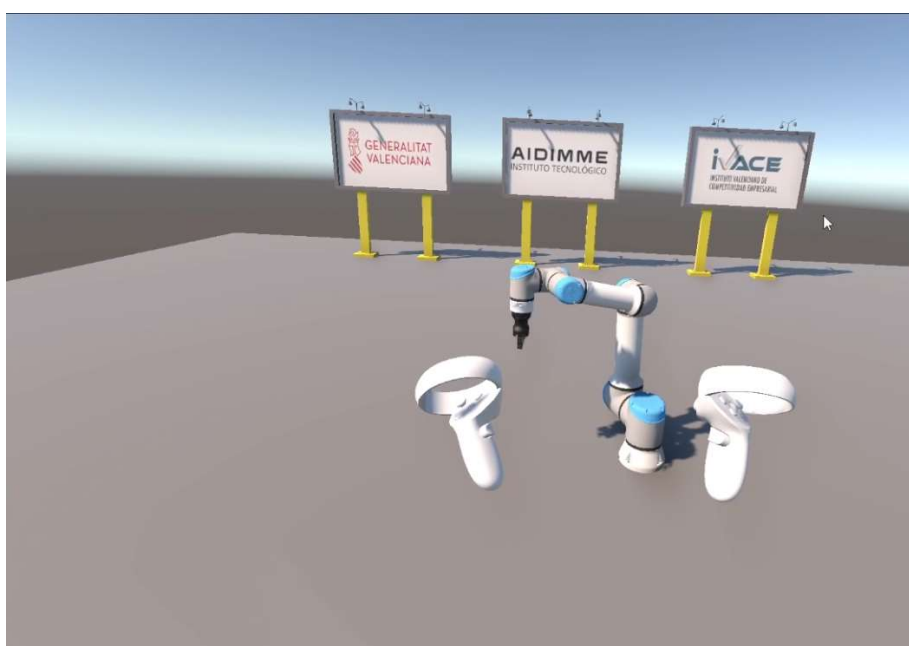
El último paso, es la generación del script de robot. Al fijar un punto, ya sea de paso o de herramienta, el script de control del modelo guardará en memoria un array que contiene toda la información de los puntos seleccionados, así como los ángulos de rotación de cada articulación y el tipo de punto. Para generar el programa de robot, otro script se ocupa de acceder a esta información y generar un código secuencial en lenguaje UR que mueva el robot a la posición inicial y de ahí se mueva a los distintos puntos señalados por el usuario. Basta ahora con guardar el archivo generado en un *pen-drive* y utilizarlo en el robot para ejecutar el comportamiento programado. En el anexo 1 se puede ver el ejemplo de un programa generado por el sistema DIGIBOT.

## 5. Resultados

En este apartado se desarrollan los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto DIGIBOT.

### 5.1 Descripción de la interfaz desarrollada

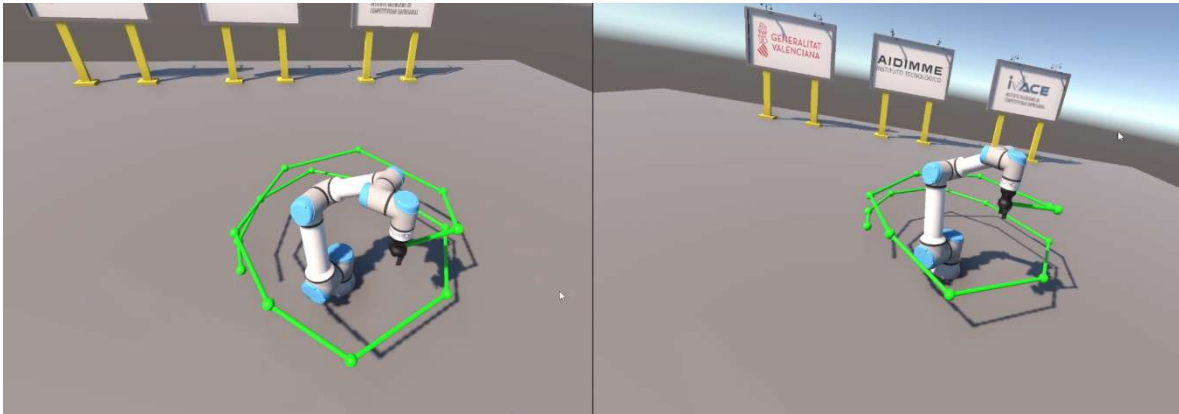
Cuando el usuario inicia la aplicación de DIGIBOT, se encuentra en un espacio inmersivo en el que se puede ver el suelo, el UR5, los carteles de los logos y, si mira sus manos, verá los Touch Controller de las Meta Quest 2, tal como se muestra en la **Ilustración 19**.



*Ilustración 19 - Interfaz de RV de DIGIBOT.  
Fuente: Elaboración propia.*

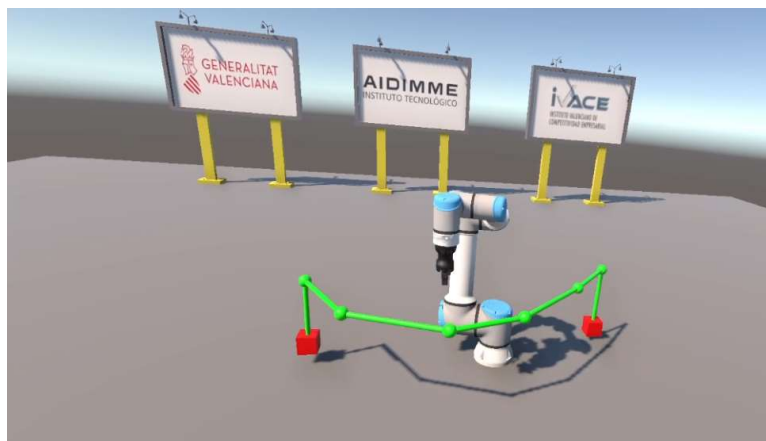
Utilizando los Touch controller de la forma indicada en la sección 4.2.3 Sistema de control del robot, el usuario puede controlar el robot, este al incluir sucesivos puntos de paso, el usuario generará un camino que recorrerá el robot. Al encontrarse en un entorno inmersivo tridimensional, el usuario posee la capacidad de moverse alrededor del robot, permitiéndole observar con gran precisión cuál será el camino exacto del robot, si el sistema utilizara una pantalla tradicional plana, se encontrarían muchas situaciones en las que el usuario no puede apreciar bien el punto, o puede confundirlo al no poder apreciar correctamente la profundidad. Se muestra en la **Ilustración 20**, distintas perspectivas de un camino generado por DIGIBOT.





*Ilustración 20 - Camino desarrollado con DIGIBOT desde varios puntos de vista.  
Fuente: Elaboración propia.*

Por último, DIGIBOT permite también la utilización de los puntos de acción de herramienta. Al introducir uno de estos, el programa de robot primero desplazará la herramienta hasta este punto y después ejecutará una acción, esta acción depende de la herramienta seleccionada. En el caso expuesto, se trata de una pinza, por lo que un punto de acción ejecutará una apertura o cierre de la pinza. En la siguiente imagen se puede comprobar lo sencillo que resulta programar con DIGIBOT un programa que haga al robot aproximarse hasta un punto, coger una pieza, transportarla hasta otro punto y colocarla.



*Ilustración 21 - Programación de movimiento de pieza utilizando una pinza.  
Fuente: Elaboración propia.*

### 5.3 Pruebas con usuarios

Con el fin de comprobar la usabilidad y la eliminación de barreras de entrada a la aplicación que supone DIGIBOT, se ha pedido a distintas personas del personal de AIDIMME que utilicen la aplicación para desarrollar un programa de robot. Tras estas pruebas se puede ver que DIGIBOT ofrece una interfaz mucho más intuitiva para la programación de robot ya que los usuarios son capaces de generar programas completos de robot tras solamente unos minutos utilizando la aplicación.

## 6. Discusión

### 6.1 Comparación con el estado del arte

El proyecto DIGIBOT supone un salto respecto al estado del arte establecido hasta el momento. El sistema de realidad virtual permite un tipo de interacción nuevo entre persona y robot. Tal como se ha expuesto en el punto anterior, los tiempos de aprendizaje para desarrollar un programa de robot solvente se reducen drásticamente, permitiendo a usuarios que nunca han programado generar un programa de robot sin tener que escribir una línea de código. Además, el sistema DIGIBOT provee no solo de la capacidad de mover, sino también de un accionador de herramienta para realizar tareas reales.

### 6.3 Limitaciones del proyecto

El proyecto al ser pionero en su campo consta de ciertas limitaciones, se destacan las siguientes:

- No existe una opción para cambiar la velocidad de movimiento.
- El método de aproximación está definido siempre en vertical por lo que limita el uso en trabajos que necesiten otros ángulos de aproximación.
- El método de acción de herramienta está definido como un simple bit que puede ser útil para un elemento como una pinza, aunque puede quedar corto para herramientas más complejas
- El sistema solamente permite la creación de nuevos programas de robot, pero no contempla la carga o modificación de programas ya creados.
- El sistema se podría beneficiar de herramientas de creación de programas más complejas como bucles o condicionales.

## 7. Conclusiones y trabajo futuro

En esta última sección del documento se expresan las conclusiones que se han podido obtener del desarrollo del proyecto, así como se exponen puntos en los que futuros trabajos podrían centrar sus esfuerzos.

### 7.1 Conclusiones generales

Tras el desarrollo del proyecto DIGIBOT y de las pruebas llevadas a cabo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Un sistema gráfico que requiere pocas habilidades técnicas de programación y sistemas para programar robots rebaja enormemente las barreras de entrada y por tanto el precio, facilitando su implantación en instalaciones productivas reales.
2. El entorno de realidad virtual ofrece una gran ventaja respecto a un sistema tradicional de visualización en pantalla al permitir al usuario moverse de manera sencilla y natural dentro del entorno tridimensional, entendiendo así de manera simple la trayectoria exacta que seguirá el robot.
3. La integración de la tecnología Meta Quest 2 en el desarrollo de interfaces de realidad virtual para la programación de robots, demuestra la viabilidad y eficacia de los dispositivos de realidad virtual de consumo para aplicaciones industriales complejas. Esta aproximación no solo reduce costes, sino que también acelera el proceso de aprendizaje y familiarización con la tecnología robótica.
4. El uso de los mandos de Meta Quest para indicar movimientos y acciones ha resultado ser intuitivo para los usuarios, lo cual disminuye significativamente el tiempo de entrenamiento necesario para operar eficientemente el sistema. Además, esta interacción directa mejora la precisión de la programación del robot al ofrecer un feedback inmediato y tangible de las acciones que se están programando.
5. La posibilidad de simular en tiempo real las operaciones robotizadas dentro del entorno de realidad virtual antes de su ejecución física, permite a los usuarios identificar y corregir posibles errores de manera preventiva. Esto minimiza el riesgo de daños al equipo o a la instalación, y optimiza los tiempos de producción al reducir la necesidad de pruebas repetitivas.
6. La satisfacción y retroalimentación positiva de los usuarios que han participado en las pruebas del proyecto DIGIBOT subrayan la importancia de crear interfaces amigables y accesibles para la programación de robots. Esta tendencia hacia la simplificación y democratización del acceso a la tecnología robótica es clave para su adopción en un espectro más amplio de industrias y aplicaciones.
7. Finalmente, el proyecto DIGIBOT pone de manifiesto la importancia de la colaboración interdisciplinaria, uniendo expertos en robótica, desarrollo de software, y diseño de interfaces de usuario. Esta colaboración ha sido fundamental para abordar con éxito los desafíos técnicos y de usabilidad, y para innovar en la forma en que se interactúa con la tecnología robótica.

### 7.3 Trabajo futuro

A continuación, se muestran posibles vías de investigación y desarrollo futuro.

1. **Integración con RA:** Un problema que se ha observado al realizar la programación en un entorno completamente de realidad virtual, es que el usuario no tiene noción espacial del resto del entorno, por lo que dificulta buscar la posición exacta a la que tiene que ir. Un futuro desarrollo podría optar por utilizar space anchors para integrar el robot en su posición real utilizando realidad aumentada, facilitando así el desarrollo.
2. **Opciones de programación aumentadas:** Tal como se ha comentado en la sección de limitaciones del proyecto, DIGIBOT permite un desarrollo sencillo de programas de robot, pero tiene limitaciones cuando se quieren desarrollar programas más complejos. Un campo para desarrollar es introducir dentro de la aplicación nuevas opciones que permitan hacer desarrollos más complejos, como por ejemplo controlar la velocidad, cambiar de herramienta, generar bucles o leer señales externas.
3. **Simulación y Predicción de Resultados:** Un área de desarrollo futuro importante es la mejora de las capacidades de simulación dentro del entorno virtual. Esto incluye la simulación de la física más precisa y la predicción de resultados de acciones más complejas. Tal mejora permitirá a los usuarios anticipar y resolver problemas potenciales antes de la implementación real, aumentando la seguridad y eficiencia del proceso de programación.
4. **Colaboración Multiusuario:** Implementar funcionalidades que permitan la colaboración en tiempo real de varios usuarios dentro del entorno virtual. Esto facilitaría el trabajo en equipo en la programación y ajuste de los robots, permitiendo a los usuarios compartir instantáneamente sus visiones y modificaciones, lo que podría ser especialmente útil en entornos de enseñanza y desarrollo colaborativo.
5. **Integración de Inteligencia Artificial:** Explorar la posibilidad de integrar algoritmos de inteligencia artificial que puedan aprender de las interacciones del usuario para ofrecer sugerencias de programación, optimización de rutas y solución de problemas en tiempo real. La IA también podría utilizarse para mejorar la interfaz de usuario mediante la adaptación dinámica a las preferencias y comportamientos del usuario.
6. **Compatibilidad con Diversos Robots y Herramientas:** Ampliar la compatibilidad del sistema para que funcione con una variedad más amplia de robots y herramientas. Esto incluye el desarrollo de módulos de software específicos que permitan la programación y control de distintos tipos de robots industriales y de servicio, así como la integración con sistemas de gestión de flotas robóticas.

## 8. Referencias bibliográficas

Andersen, R. S. (31 de Mayo de 2018). Kinematics of a UR5. *Aalborg University*.

De Moura Costa, G., Roberto Petry, M., & Paulo Moreira, A. (2022). Augmented Reality for Human–Robot Collaboration and. *MDPI Sensors*.

Meta Platforms. (2023). *Meta Quest 2: Gafas inmersivas de realidad virtual todo en uno*.  
Obtenido de <https://www.meta.com/es/quest/products/quest-2/>

Mourtzis, D., Razvan, B. G., Godina, R., & Smalcerz, A. (2023). Recent Advanced Applications of Virtual Industrial Informatics and Robotics. *MDPI Electronics*, 12-23.

Universal Robots. (2023). *DH Parameters for calculations of kinematics and dynamics*.  
Obtenido de [www.universal-robots.com](http://www.universal-robots.com): <https://www.universal-robots.com/articles/ur/application-installation/dh-parameters-for-calculations-of-kinematics-and-dynamics/>

Valve Inc. (2022). *Valve Index*. Obtenido de Steam Powered:  
<https://store.steampowered.com/valveindex>

Wolff, D. d. (16 de Junio de 2021). *The new wave of robotic automation*. Obtenido de MIT News: <https://news.mit.edu/2021/new-wave-robotic-automation-0616>

## 9. Anexos

### 9.1 Programa de robot generado por DIGIBOT

```
def digibot_20231212131852:
    global speed_ms = 0.250
    global speed_rads = 0.750
    global accel_mss = 1.200
    global accel_radss = 1.200
    global blend_radius_m = 0.03
    global ref_frame = p[0,0,0,0,0,0]

    movej([0.748598, -2.713655, -0.528234, -1.470503, 1.570796, 0.748598], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([0.648179, -2.555494, -0.838552, -1.318347, 1.570796, 0.648179], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([0.539610, -2.437719, -1.063241, -1.211426, 1.570796, 0.539610], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([0.429016, -2.342075, -1.241102, -1.129218, 1.570796, 0.429016], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([0.317008, -2.230252, -1.442797, -1.039338, 1.570796, 0.317008], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([0.291086, -2.028998, -1.784163, -0.899234, 1.570796, 0.291086], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([0.373780, -1.799731, -2.125287, -0.787383, 1.570796, 0.373780], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([0.498538, -1.580701, -2.384958, -0.746725, 1.570796, 0.498538], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([0.564296, -1.242708, -2.641451, -0.828236, 1.570796, 0.564296], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([0.834749, -1.371448, -2.563225, -0.777722, 1.570796, 0.834749], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([0.971079, -1.567983, -2.397751, -0.746654, 1.570796, 0.971079], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([1.110281, -1.727293, -2.219151, -0.765941, 1.570796, 1.110281], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([1.054528, -1.939410, -1.924592, -0.848391, 1.570796, 1.054528], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([0.916380, -2.101376, -1.665096, -0.945913, 1.570796, 0.916380], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([0.802150, -2.314656, -1.291209, -1.106521, 1.570796, 0.802150], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
    movej([0.725666, -2.572004, -0.806576, -1.333802, 1.570796, 0.725666], accel_radss, speed_rads, 0, blend_radius_m)
end

digibot_20231212131852()
```

# **AIDIMME**

## **INSTITUTO TECNOLÓGICO**

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)  
46980 Paterna. Valencia (España)  
Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —

Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)  
46980 Paterna. Valencia (España)  
Tlf. 961 318 559 - Fax 960 915 446

[aidimme@aidimme.es](mailto:aidimme@aidimme.es)

[www.aidimme.es](http://www.aidimme.es)