



Universidad de Oviedo

Memoria del Trabajo Fin de Máster realizado por

PAULINO SAN MIGUEL HERRERA

para la obtención del título de

Máster en Ingeniería de Automatización e Informática Industrial

**MODELADO Y SIMULACIÓN
DE CÉLULA ROBÓTICA COLABORATIVA
MEDIANTE REALIDAD VIRTUAL**

Julio de 2019

(RobotCellSim)

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE CÉLULA ROBÓTICA COLABORATIVA
MEDIANTE REALIDAD VIRTUAL.**

**MODELING AND SIMULATION OF A COLLABORATIVE ROBOTIC CELL
THROUGH VIRTUAL REALITY.**

AUTOR

Paulino San Miguel Herrera.

TUTOR

Antonio Miguel López Rodríguez (Universidad de Oviedo).

COTUTOR

Luis Pérez Castaño (Fundación IDONIAL).

RESUMEN

La industria 4.0 se fundamenta en el uso de diversos habilitadores tecnológicos (robótica colaborativa, realidad virtual, gemelo digital, internet de las cosas, ...), a lo largo de toda la cadena de valor.

La incorporación de estas tecnologías en el proceso productivo puede suponer un impacto muy positivo en las organizaciones, con el consiguiente aumento de productividad y seguridad.

Este trabajo busca una solución que integre tecnologías de Industria 4.0 para garantizar fiabilidad y robustez, aplicadas al diseño y simulación mediante realidad virtual de una instalación robótica de propósito general, como paso previo a su integración física.

La instalación incluye varios robots colaborativos, así como un robot industrial convencional.

La simulación podrá ser explotada a lo largo de todo el ciclo de vida de la instalación: preparación de operarios, optimización y desarrollo de nuevos procesos, futuras ampliaciones...

Además, podrá emplearse como base para obtener un gemelo digital que permita una conexión bidireccional entre la instalación real y la virtual.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 7 |
| 1.1. MOTIVACIÓN..... | 7 |
| 1.2. OBJETIVO | 8 |
| 1.3. RESULTADOS ESPERADOS | 8 |
| 1.4. FLUJO DE TRABAJO..... | 9 |
| ESTADO DEL ARTE | 10 |
| 2.1. ROBÓTICA COLABORATIVA..... | 10 |
| ROBOTS EN LA INDUSTRIA..... | 10 |
| 2.2. REALIDAD VIRTUAL | 19 |
| EJECUCIÓN | 20 |
| 3.1. INTRODUCCIÓN..... | 20 |
| 3.2. HITO 1. Componentes de la instalación robótica..... | 21 |
| ANÁLISIS DE REQUISITOS. | 21 |
| SELECCIÓN DE COMPONENTES. | 24 |
| 3.3. HITO 2. Diseño de procesos. | 28 |
| ANÁLISIS DE REQUISITOS. | 28 |
| DISEÑO DE PROCESOS. | 29 |
| 3.4. HITO 3. Modelado del entorno y de la instalación..... | 32 |
| ESCANEO Y MODELADO DEL ENTORNO. | 32 |
| MODELADO DE LA INSTALACIÓN ROBÓTICA. | 38 |
| 3.4. HITO 4. Simulación mediante realidad virtual..... | 42 |
| ESTUDIO CINEMÁTICO. | 42 |
| SOFTWARE DE SIMULACIÓN..... | 52 |
| DISEÑO DE LA APLICACIÓN. | 53 |
| SIMULACIÓN DE PROCESOS..... | 64 |
| PRUEBAS DE SOFTWARE | 72 |
| 4.1. PRUEBAS CON USUARIOS..... | 72 |
| 4.2. CONCLUSIONES..... | 75 |
| CONCLUSIÓN FINAL | 77 |
| REFERENCIAS | 79 |

1

INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se introduce el porqué del trabajo, los objetivos que se pretenden conseguir, los resultados esperados a su finalización, y un resumen del flujo de trabajo llevado a cabo.

1.1. MOTIVACIÓN

El presente trabajo surge con la necesidad de sentar las bases para un proyecto de la empresa donde se ha realizado (Fundación IDONIAL):

“Desarrollo de aplicaciones robóticas para la mejora de la productividad y la seguridad en la Industria 4.0 (ROBOTS 4.0)”

Donde se busca desarrollar soluciones robotizadas para la mejora de la competitividad en la industria, siguiendo con la estrategia europea de digitalización por medio de las tecnologías que brinda la Industria 4.0 [1].

Para ello se proponen tres demostradores con el fin de mostrar el potencial de la robótica colaborativa a nivel industrial, además de las ventajas de la aplicación conjunta de diversas tecnologías de la Industria 4.0 (realidad virtual, realidad aumentada, visión artificial, simulación de procesos, fabricación aditiva, ...):

- *Demostrador 1. Gemelo digital para robótica.*
- *Demostrador 2. Robótica colaborativa persona-máquina.*
- *Demostrador 3. Robótica colaborativa máquina-máquina.*

1.2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo está ligado al demostrador 1 del proyecto de la fundación, que puede resumirse en los siguientes puntos:

- 1) Modelar virtualmente la futura instalación robótica y el entorno reservado para ello.
- 2) Interactuar con el modelo virtual mediante tecnologías de realidad virtual.
- 3) Desarrollar un gemelo digital.

Como en el momento en que se ha desarrollado el trabajo no se dispone de la célula robótica, el tercer punto se mantiene como una mejora a futuro.

El objetivo que se ha definido para el trabajo, y que incluye los dos puntos iniciales, es el siguiente:

“Desarrollar una aplicación informática capaz de simular mediante técnicas de realidad virtual el comportamiento de una instalación robótica real”.

1.3. RESULTADOS ESPERADOS

Se han definido los siguientes hitos intermedios con el fin de alcanzar el objetivo de una forma secuencial y organizada:

- **Hito 1.**
Componentes de la instalación robótica.
- **Hito 2.**
Diseño de procesos.
- **Hito 3.**
Modelado del entorno y de la instalación.
- **Hito 4.**
Simulación mediante realidad virtual.

1.4. FLUJO DE TRABAJO

Se ha dividido cada uno de los hitos en las siguientes tareas.

- **Hito 1. Componentes de la instalación robótica.**
 - Análisis de requisitos.
 - Selección de componentes.

- **Hito 2. Diseño de procesos.**
 - Análisis de requisitos.
 - Diseño de procesos.

- **Hito 3. Modelado del entorno y de la instalación.**
 - Escaneado y modelado del entorno.
 - Modelado de la instalación robótica.

- **Hito 4. Simulación mediante realidad virtual.**
 - Estudio cinemático.
 - Software de simulación.
 - Diseño de la aplicación.
 - Simulación de procesos.

2

ESTADO DEL ARTE

Los grandes avances tecnológicos vienen acompañados de fuertes cambios en la industria:

- El primer gran cambio data de finales del siglo XVIII con la introducción de la máquina de vapor, más conocido como primera revolución industrial.
- Le sigue la producción en masa, gracias a la división del trabajo y a la energía eléctrica (segunda revolución industrial).
- A principio de los años 70 del siglo pasado se introduce la electrónica, la robótica y las tecnologías de la comunicación, lo que pasa a denominarse tercera revolución industrial.

Ahora nos encontramos en la cuarta revolución industrial, basada en la aplicación de herramientas digitales en toda la cadena de valor.

En este capítulo se aborda el estado del arte de dos de estas herramientas, en torno a las que gira el trabajo: la robótica colaborativa y la realidad virtual.

2.1. ROBÓTICA COLABORATIVA

ROBOTS EN LA INDUSTRIA.

El primer uso de un robot en la industria llegó de la colaboración entre George Devol (que contaba con la patente de la máquina que se fabricó), y el empresario Joseph Engelberger, ambos considerados padres de la robótica industrial.

Bautizaron a su creación como Unimate (figura 2.1.1) y, en 1961, fue instalado en una fábrica de General Motors de New Jersey [4].

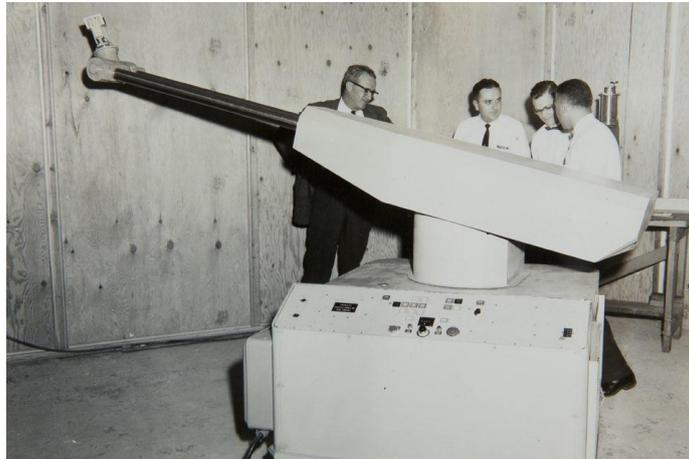


Figura 2.1.1. Primer robot industrial

Este robot (aun pareciéndose más bien poco a los robots de las obras literarias de la época), marcó un antes y un después en el mundo industrial ya que, además de alejar al hombre de tareas monótonas y peligrosas, era capaz de trabajar de forma continua y eficiente.

El Unimate marcó un punto de inflexión en la automatización industrial reduciendo los tiempos y costes de producción a valores sin precedentes, lo que propició la aparición de empresas dedicadas al campo de la robótica, que no tardaron en sacar al mercado una amplia variedad de robots capaces de automatizar cada vez un mayor número de procesos industriales.

Actualmente la robótica cuenta con sus propias normas ISO [5], donde se define como la ciencia y práctica del diseño, la fabricación, y la aplicación de robots, entendiéndose como tal a mecanismos accionados que permiten ser programados en dos o más ejes con cierta autonomía, capaces de moverse en su entorno para la realización de ciertas tareas.

Además, se define un robot industrial como un manipulador (máquina en la que el mecanismo suele consistir en una serie de segmentos unidos por articulaciones o que se deslizan uno respecto al otro, con el propósito de agarrar y/o mover objetos), controlado automáticamente, reprogramable y multipropósito, programable en tres o más ejes, que puede encontrarse fijo en un lugar o ser móvil, y que sirve para automatizar aplicaciones industriales.

ROBOTS COLABORATIVOS.

El principal problema asociado a los robots industriales convencionales está ligado a la seguridad del operario, un robot no deja de ser una máquina que, si no se trata de forma adecuada, puede producir graves lesiones.

La solución más extendida para que el robot pueda trabajar de forma eficiente y segura, sin suponer peligro para el operario, consiste en emplear una separación física entre ambos durante el proceso de producción normal.

A finales de los 90 apareció un nuevo enfoque en la robótica industrial.

Se pensó en los robots como posible solución a los problemas ergonómicos asociados a los operarios en las fábricas de la época, lo que llevó a la aparición de los robots colaborativos (cobots), especialmente pensados para trabajar de forma conjunta con operarios humanos, ayudándolos en el desempeño de sus labores [6].

Los primeros robots de este tipo no contaban con fuerza motriz, pero eran capaces de restringir el movimiento en ciertos grados de libertad, permitiendo manipular cargas de forma eficiente y segura (figura 2.1.2).



Figura 2.1.2. Inicios de la robótica colaborativa

Quitar toda la fuerza motriz a estas máquinas suponía una pérdida considerable de sus capacidades, por lo que los trabajos que siguieron en esta línea optaron por añadir cierta potencia a los robots, dotándolos de cierta autonomía, pero siempre teniendo en cuenta la seguridad del operario (baja potencia, bajas velocidades, ...).

Su aceptación a nivel industrial fue tal que, a partir de 2016, cuentan con su propia norma ISO, la "ISO/TS 15066:2016", que recoge que debe cumplir un robot para poder usarse en la industria de manera segura y colaborativa (criterios de diseño, potencias, velocidades, ...).

En la norma ISO se recogen un total de cuatro aplicaciones robóticas colaborativas:

1. Paro controlado de seguridad.

El robot se detiene cuando alguien accede a su zona de trabajo, se hace necesaria una señal de realimentación para devolverlo a su operación normal.

Es común en aplicaciones donde se precisan accesos puntuales del operario para realizar alguna tarea mientras el robot realiza su trabajo (el robot seguirá alimentado, pero con los frenos accionados), de esta forma se puede dotar de cierto grado de colaboración a un robot estándar.

2. Guiado manual.

Este tipo de colaboración se emplea para enseñar un determinado recorrido a un robot.

Se puede usar con robots industriales convencionales a los que se les añade un dispositivo capaz de registrar las fuerzas que el operario aplica en la herramienta, no obstante, en estos casos, al terminar el guiado el robot deja de ser colaborativo.

3. Supervisión de la velocidad y la distancia de separación.

Se supervisa en todo momento el entorno del robot para registrar la posición del trabajador mediante el uso de algún sistema de visión.

El robot variará su velocidad de operación dependiendo de la distancia a la que se encuentra el trabajador, pudiendo incluso detenerse si se acerca demasiado.

Se reserva para operaciones donde el operario accede a la zona de trabajo del robot de forma frecuente.

4. Limitación de potencia y fuerza.

El robot es capaz de registrar fuerzas fuera de lo normal en su recorrido y parar en caso de sobrepasar un umbral predefinido.

Por lo general, al hablar de cobots se hace referencia a aquellos robots que entran dentro de la categoría de limitación de potencia y fuerza.

Este tipo de robots están diseñados con la colaboración en mente (reducción/eliminación de zonas abiertas, contornos suavizados, detección de colisiones, ...), de forma que no supongan un peligro para el operario.

Según el mecanismo empleado para la detección de colisiones, los cobots se dividen en:

- **Cobots con sensores en las articulaciones.**

Son los más extendidos.

Para conocer las fuerzas a las que se somete el robot se emplean sus articulaciones, bien a través de la corriente que pasa por los motores de cada una, o bien a través de sensores de par-fuerza.

- **Cobots con sensores de fuerza en la base.**

En este caso se hace uso de un gran sensor de par-fuerza en la base del robot. Es más común encontrar este tipo de sensorizado en adaptaciones de robots convencionales.

- **Cobots con sensores de piel.**

Se recubre el robot completamente con sensores de presión formando una especie de “piel” capaz de detectar colisiones en todo su contorno.

- **Cobots inherentemente seguros.**

Muy pocos robots entran en esta categoría, sólo aquellos que, aun teniendo en cuenta todo tipo de fallos (hardware y software), no suponen un peligro para el operario.

ESTUDIO DE MERCADO.

Si bien a nivel industrial los cobots aún no han alcanzado su punto álgido, más por desconocimiento que por falta de utilidad, cada día más y más empresas apuestan por esta tecnología, lo que ha propiciado que la mayor parte de fabricantes de robots industriales cuenten con sus propios robots colaborativos, y el nacimiento de nuevas empresas dedicadas exclusivamente a este campo de aplicación.

Debido al alto número de robots colaborativos disponibles en el mercado (muchos de ellos con funcionalidades y características parecidas), se ha decidido abordar el estudio de mercado atendiendo únicamente a las empresas con un mayor peso en el sector.

La selección se ha realizado en base a un estudio de technavio (empresa de investigación de mercados a nivel global), donde se recogen las 21 empresas relacionadas con soluciones robóticas que presentaron una mayor recaudación en el año 2017 [7].

De todas ellas se han seleccionado aquellas que ofertan soluciones de robótica colaborativa propias:

Mitsubishi Electric.

Presentó a finales de 2018 un robot colaborativo que se espera salga al mercado a lo largo de 2019, el Melfa Melcor (figura 2.1.3).



Figura 2.1.3. Melfa Melcor

ABB.

Ofrece desde 2015 un robot colaborativo de doble brazo denominado Yumi (figura 2.1.4).

Hoy en día es uno de los robots más colaborativos del mercado, gracias a su diseño y baja carga nominal.



Figura 2.1.4. Yumi

Omron Adept Technologies.

La empresa japonesa ha formado una alianza estratégica con “Techman Robots” (empresa taiwanesa fabricante de robots colaborativos), para añadir a sus filas la serie TM de cobots (figura 2.1.5), que oferta desde finales de 2018.



Figura 2.1.5. Serie TM

FANUC Robotics.

A mediados de 2015 Fanuc puso a la venta su primer robot colaborativo, del que destaca su capacidad de carga nominal de 35 kg.

Actualmente su serie CR cuenta con un total de cinco robots de este tipo (figura 2.1.6).



Figura 2.1.6. Serie CR

Yaskawa.

Desde 2017 cuenta con su propio cobot, el HC-10 (figura 2.1.7).



Figura 2.1.7. HC-10

Kuka.

Una de las primeras empresas en fabricar cobots industriales. El primero que ofertaron, el LBR 3, se puso a la venta en 2004, predecesor de su cobot más famoso, el LBR iiwa (figura 2.1.8), que se encuentra en el mercado desde el año 2013.



Figura 2.1.8. LBR iiwa

En la feria de Hannover de 2018 presentaron un nuevo robot colaborativo, el LBR Issy.

Kawasaki.

Cuentan desde 2015 con un cobot de doble brazo tipo SCARA, el duAro (figura 2.1.9).



Figura 2.1.9. duAro

Staubli.

Disponen de su propia serie de robots colaborativos, la serie TX2 (figura 2.1.10).



Figura 2.1.10. Serie TX

Denso Corporation.

Cuentan con su propio cobot desde 2018 al que han denominado COBOTTA (figura 2.1.11).



Figura 2.1.11. COBOTTA

Nachi-Fujikoshi.

Disponen de un cobot propio desde 2018, el CZ10 (figura 2.1.12).



Figura 2.1.12. CZ10

Comau Robotics.

Cuentan con el cobot más grande del mercado al que han denominado Aura (figura 2.1.13), el cual ofrece una capacidad de carga nominal de 170 kg.



Figura 2.1.13. Aura

Universal Robots.

Empresa dedicada en exclusiva al mundo de los cobot, ofertan la serie UR que cuenta con tres modelos diferentes (figura 2.1.14).

En 2018 ha salido la nueva serie e, con la idea de mejorar ciertas características de sus predecesores.

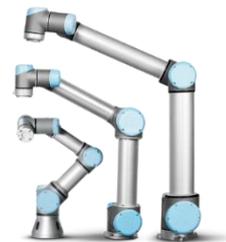


Figura 2.1.14. Serie UR

SIASUN Robot and Automation.

Cuenta con varios modelos de cobots industriales (figura 2.1.15).



Figura 2.1.15. Cobots SIASUN

Rethink Robotics.

Otra de las empresas dedicadas desde sus inicios al campo de la robótica colaborativa. En 2012 lanzaron su primer cobot, Baxter, y en 2015 otro más pequeño y flexible, Sawyer, para trabajos a menor escala (figura 2.1.16). En 2018 cerró sus puertas y pasó a funcionar como unidad de negocio de la firma HAHN.



Figura 2.1.16. Sawyer y Baxter

Schunk.

Empresa dedicada a tecnologías de sujeción y sistemas de agarre. Dispone de una gama de pinzas especialmente diseñadas para su uso junto con robots colaborativos, la serie CO-ACT (figura 2.1.17).



Figura 2.1.17. Serie Co-act

Más del 70% de las empresas estudiadas disponen de soluciones colaborativas propias, esta fuerte apuesta de las grandes empresas del sector es un claro indicador del potencial que presenta esta tecnología.

Además, muchos de los cobot mostrados han aparecido durante el último año y otros están a punto de aparecer, lo que indica que este mercado se encuentra actualmente en crecimiento.

El objetivo de este estudio ha sido mostrar el potencial de la robótica colaborativa, sin entrar en las características de los cobot mostrados, para ello se recomienda visitar las páginas web de los fabricantes.

Las empresas estudiadas no representan la totalidad del sector, en [8] pueden consultarse más cobots de interés.

2.2. REALIDAD VIRTUAL

Esta tecnología explota la estereopsis humana, es decir, la capacidad del cerebro de extraer información tridimensional a partir de dos imágenes ligeramente distintas [9].

El objetivo que se persigue es la creación de un entorno virtual que el usuario pueda aceptar como su nueva realidad.

Los dispositivos más avanzados en esta línea están formados por un visor que se sujeta a la cabeza del usuario, y unos controles que le permiten interactuar con el entorno virtual.

El primer dispositivo con estas características no es nuevo, data de 1960, aunque no fue hasta 2012, con la aparición de las Oculus Rift, cuando se popularizó a gran escala (gracias en su mayor parte al aumento de prestaciones de los computadores y sus precios cada vez más asequibles) [10].

Centrándose en el ámbito industrial una de las aplicaciones más prometedoras para esta tecnología es la simulación de procesos, aplicación en la que se centra el presente trabajo.

Los dos dispositivos más extendidos son: las HTC Vive (figura 2.2.1) y las Oculus Rift (figura 2.2.2).



Figura 2.2.1. HTC Vive



Figura 2.2.2. Oculus Rift

3

EJECUCIÓN

En este capítulo se muestran de forma detallada las tareas realizadas a lo largo del trabajo, así como los resultados intermedios que se han ido obteniendo, siguiendo el flujo de trabajo mostrado en el capítulo inicial.

3.1. INTRODUCCIÓN

Tal como se mostró previamente, el trabajo se ha dividido en los siguientes hitos:

- **Hito 1.**
Concretar los elementos que formarán parte de la instalación real.

- **Hito 2.**
Definir procesos genéricos con el fin de demostrar el potencial de la robótica colaborativa en el entorno industrial.

- **Hito 3.**
Encontrar una ubicación óptima para la instalación dentro de la fundación y realizar su modelado virtual, junto con el de la propia instalación robótica.

- **Hito 4.**
Emplear técnicas de realidad virtual para simular los procesos definidos en el hito 2, en base a los modelos obtenidos en el hito 3.

En los siguientes apartados se abordará cada uno de ellos, que se han dispuesto de forma tal que, al llegar al final, se habrá cumplido con el objetivo del trabajo:

“Desarrollar una aplicación informática capaz de simular mediante realidad virtual el comportamiento de una instalación robótica real”.

Requisitos adicionales de cada bloque:

Brazo robótico 1.

- Robot para entornos industriales.
- Flexibilidad para realizar diferentes operaciones/tareas (recogida de cargas, manejo de herramientas, escaneado, picking o atornillado, ...).
- Orientado a aplicaciones colaborativas (reducción de fuerza y velocidad).
- Estructura ligera para evitar accidentes y permitir el trabajo colaborativo seguro con personas sin barreras físicas.
- Sensores integrados para la detección de contacto (capacidad sensitiva).
- Entradas y salidas digitales para la comunicación con sensores externos, PLCs, ...
- Disponibilidad de herramientas y facilidad de integración.
- Capacidad de movimiento (grados de libertad) en espacios reducidos y precisión.
- Capacidad de carga de al menos 12 kg.
- Interfaz (consola) de programación y manejo sencilla

Brazo robótico 2.

- Robot para entornos industriales.
- Flexibilidad para realizar diferentes operaciones/tareas (ensamblado de piezas y pequeños componentes, manejo de herramientas, escaneado, picking o atornillado, ...).
- Robot de 2 brazos.
- Orientado a aplicaciones colaborativas (reducción de fuerza y velocidad).
- Estructura ligera para evitar accidentes y permitir el trabajo colaborativo seguro con personas sin barreras físicas.
- Sensores integrados para la detección de contacto (capacidad sensitiva).
- Entradas y salidas digitales para la comunicación con sensores externos, PLCs, ...
- Disponibilidad de herramientas y facilidad de integración.
- Capacidad de movimiento (grados de libertad) en espacios reducidos y precisión.
- Capacidad de carga de al menos 0,5 kg en cada brazo.
- Interfaz (consola) de programación y manejo sencilla.

AGV (vehículo de guiado automático) + brazo robótico.

- Robot y AGV para entornos industriales.
- Flexibilidad para realizar diferentes operaciones/tareas (recogida y traslado de cargas, manejo de herramientas, escaneado, picking o atornillado, ...).
- Orientado a aplicaciones colaborativas (reducción de fuerza y velocidad).
- Estructura ligera para evitar accidentes y permitir el trabajo colaborativo seguro con personas sin barreras físicas.
- Sensores integrados para la detección de contacto (capacidad sensitiva) en el brazo robótico.
- El AGV tendrá seguridad integrada en el sistema de navegación para evitar colisiones con personas y objetos.
- Entradas y salidas digitales para la comunicación con sensores externos, PLCs, ...
- Disponibilidad de herramientas y facilidad de integración.
- Capacidad de movimiento (grados de libertad) en espacios reducidos y precisión.
- Capacidad de carga del robot de al menos 5 kg.
- Capacidad de carga del AGV de al menos 100 kg.
- Autonomía del AGV de al menos 8 horas.
- Para la instalación del AGV no debería ser necesario realizar ningún tipo de obra civil, ni instalar balizas repetidoras, ni circuitos de bandas magnéticas de guiado o similares.
- Interfaz (consola) de programación y manejo sencilla.

Robot paralelo.

- Robot para entornos industriales.
- Alta velocidad y precisión.
- Manipulación de piezas pequeñas.
- Integración de sistema de visión para la localización de piezas.

Sistemas externos de seguridad.

- Sistemas ópticos certificados para entornos industriales.
- Facilidad de programación e integración con los sistemas de control.
- Se requerirá al menos un escáner de 270° y una barrera/cortina con espejo intermedio.

Sistemas externos de visión.

- Integración con la propia herramienta (pinza) y con el robot para la localización/identificación.
- En caso de tecnologías láser, la categoría deberá ser segura para las personas sin necesidad de usar gafas de protección.
- Facilidad de programación e integración con los sistemas de control. Disponibilidad de SDK.

Cinta transportadora.

- Sistema para el transporte de piezas sobre las que actuarán los robots y sobre la que se colocará el sistema de visión.
- Facilidad de programación e integración con los sistemas de control.
- Debe incluir encoder, sensor de presencia, ... para sincronizar con el sistema de visión.

SELECCIÓN DE COMPONENTES.

La empresa realizó una solicitud de ofertas en base a los requisitos previos, una vez estudiadas las ofertas se ha seleccionado la que mejor se adapta a ellos, que además oferta algunos de los robots colaborativos más implantados en entornos industriales:

Brazo robótico #1:

LBR iiwa 14 (figura 3.2.2).



Figura 3.2.2. R820 (LBR iiwa 14)

Robot colaborativo de KUKA, su nombre surge a partir de las siglas de “robot de estructura liviana (LBR)” y “asistente de trabajo industrial inteligente (iiwa)”.

El modelo ofertado cuenta, entre otras cosas, con una capacidad de carga útil de 14 kg, un alcance 820 mm y una repetibilidad de 0.1 mm.

Cumple todos los requisitos impuestos en la sección anterior.

Brazo robótico #2:

Yumi (figura 3.2.3).



Figura 3.2.3. IRB14000 (Yumi)

Robot colaborativo de ABB con doble brazo, su nombre surge de las siglas inglesas de la frase “tú y yo”.

Cuenta con una capacidad de carga útil de 0.5 kg, un alcance de 559 mm y una repetibilidad de 0.02 mm, características que lo hacen especialmente interesante para el ensamblaje de piezas pequeñas.

Cumple todos los requisitos impuestos en la sección anterior.

AGV + brazo robótico:

Summit XL Steel (figura 3.2.4).

UR5 CB3 (figura 3.2.5).



Figura 3.2.4. Summit XL Steel

Plataforma móvil de ROBOTNIK capaz de soportar cargas de hasta 250 kg y moverse a velocidades de hasta 3 m/s.

Sus cuatro ruedas de tipo mecanum lo convierten en un robot holonómico, es decir, sin restricciones para moverse en el espacio que definen sus grados de libertad.



Figura 3.2.5. UR5 CB3

Robot colaborativo de Universal Robots, una de las empresas que más ha colaborado en el crecimiento del sector.

Entre sus características se encuentran una capacidad de carga útil de 5 kg, un alcance de 850 mm y una repetibilidad de 0.1 mm.

Ambos cumplen todos los requisitos impuestos en la sección anterior.

Robot paralelo:

M-1iA/0.5SL de Fanuc (figura 3.2.6).



Figura 3.2.6. M-1iA

Robot paralelo de FANUC.

Los robots paralelos están muy extendidos en el entorno industrial, lo que lo convierte en una opción realmente interesante para poder simular escenarios reales.

Cumple todos los requisitos impuestos en la sección anterior.

Sistemas externos de seguridad.

MicroScan3 (figura 3.2.7).

M-4000 (figura 3.2.8).



*Figura 3.2.7. SICK
MicroScan3*

Escáner láser de seguridad de la empresa SICK.

Gracias a su tamaño y alta configurabilidad permitirá una alta flexibilidad a la hora de definir zonas de trabajo.



Figura 3.2.8. SICK M4000

Barreras fotoeléctricas de seguridad de la empresa SICK.

Se hará uso de ellas para aumentar la seguridad de las zonas donde no se espera la entrada de personal.

Ambos cumplen todos los requisitos impuestos en la sección anterior.

Sistemas externos de visión.

Gocator 2350 (figura 3.2.9).



Figura 3.2.9. Gocator 2350

Escáner láser de LMI Technologies para control dimensional.

Cumple todos los requisitos impuestos en la sección anterior.

Cinta transportadora.

BM 8350 (figura 3.2.10).



Figura 3.2.10. BM 8350

Cinta transportadora de Interroll para aumentar la flexibilidad de la instalación robótica.

Cumple todos los requisitos impuestos en la sección anterior.

Como todos los elementos ofertados cumplen con los requisitos, a partir de este punto se trabaja con ellos.

Además, una instalación de estas características debe contar con un paro de emergencia homologado, se ha seleccionado el siguiente:

Paro de emergencia.

XALK178K (figura 3.2.11).



Figura 3.2.11. Seta de emergencia

Pulsador de emergencia de Schneider Electric.

Para poder detener la instalación si se detecta cualquier tipo de fallo.

El resto de los componentes vienen dados por el proceso a desarrollar.

3.3. HITO 2. Diseño de procesos.

Este apartado está dedicado al diseño de los procesos que se simularán en la aplicación.

ANÁLISIS DE REQUISITOS.

Para diseñar los procesos a simular se toman como referencia los demostradores propuestos en el proyecto de la empresa.

Demostrador 2.

Robótica colaborativa persona-máquina.

Se plantea una celda de ensamblaje genérica donde un operador ha de preparar piezas manualmente y empaquetarlas en diferentes lotes.

Las piezas tendrán colores y formas diferentes, y una serie de agujeros donde se debe introducir un número concreto de tapas (figura 3.3.1).

El operario trabajará mano a mano junto a un robot colaborativo que le ayudará en el proceso.

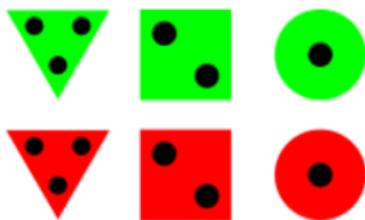


Figura 3.3.1. Piezas demostrador 2

Demostrador 3.

Robótica colaborativa máquina-máquina.

Este demostrador se centra en la colaboración entre robots, para ello se plantea el ensamblaje de un dispositivo propio de la fundación (figura 3.3.2).

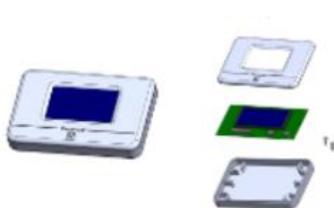


Figura 3.3.2. Dispositivo demostrador 3

DISEÑO DE PROCESOS.

Los procesos anteriores forman un buen punto de partida, no obstante, para poder realizar una simulación realista es necesario concretarlos a más bajo nivel.

A continuación, se muestran los procesos que se han diseñado, en base a los anteriores, con ayuda del equipo de simulación de procesos de IDONIAL:

Demostrador 2.

Robótica colaborativa persona-máquina.

El operario trabaja junto con un robot colaborativo (UR5) situado sobre una plataforma móvil (Summit XL Steel), en el ensamblaje de una serie de lotes formados por las piezas mostradas en la figura 3.3.2.

Cada lote está formado por seis piezas diferentes que se depositan sobre bandejas de seis posiciones, el operario y el robot trabajan de manera conjunta para asegurar que cada bandeja tenga las piezas correctas en color y forma, y que cada pieza tenga el número correcto de tapas.

Además, se comprueba que las piezas sean dimensionalmente correctas.

Se ha diseñado una zona de trabajo que permite una colaboración eficiente entre el operario y el cobot (figura 3.3.3).

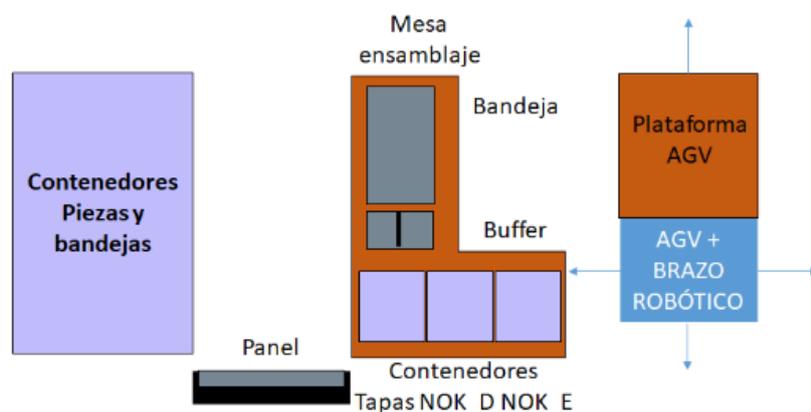


Figura 3.3.3. Zona de trabajo demostrador 2

La nueva zona de trabajo cuenta con:

- Contenedor de piezas y bandejas.
Componentes necesarios para iniciar el proceso.
- Mesa de ensamble.
Donde el operario y el robot colaboran para crear lotes de piezas.
- Panel.
Para que el operario disponga de información referente a los lotes.

El flujo de trabajo propuesto se resume en los siguientes puntos:

1. El operario coloca una bandeja sobre la zona habilitada a tal fin en la mesa de ensamblaje.
2. Cuando la bandeja está preparada el operario manda una señal al cobot para que se acerque a la mesa de ensamblaje.
El cobot se coloca sobre el buffer auxiliar de dos posiciones.
3. El operario podrá comprobar en todo momento las piezas que forman el lote a ensamblar en un panel habilitado a tal fin.
Colocará las piezas que se le irán indicando en el buffer de dos posiciones.
4. El cobot estará equipado con una cámara y un programa de visión que le permita identificar la presencia de piezas en el buffer auxiliar:
 - Si detecta la pieza correcta la coloca sobre la bandeja.
 - Si detecta una pieza dimensionalmente incorrecta la deposita en un contenedor habilitado a tal fin.
 - Si detecta una pieza dimensionalmente correcta, pero no es la pieza que se debe introducir en la bandeja, la deposita en un contenedor de piezas mal presentadas.
5. Cuando la bandeja tenga las seis piezas correctas el robot se coloca sobre ella esperando a que el operario introduzca todas las tapas.
6. El cobot será capaz de detectar cuando se han colocado las tapas correctamente, momento en el que recoge la bandeja y se la lleva a una zona de la instalación con lotes terminados.

Este proceso requiere introducir nuevos componentes en la instalación:

Pinza y cámara para UR5.

Wrist camera (figura 3.3.4).

Pinza hand-e (figura 3.3.5).



Figura 3.3.4. Wrist Camera



Figura 3.3.5. Hand-e

Ambas de la empresa ROBOTIQ (alta compatibilidad con los robots de Universal Robots).

Demostrador 3.

Robótica colaborativa máquina-máquina

Varios robots colaborativos y un robot industrial trabajan de forma colaborativa para ensamblar el dispositivo de la figura 3.3.2.

El dispositivo está formado por una carcasa inferior, una PCB y una carcasa superior, atornillados entre sí.

El proceso diseñado requiere una reconfiguración de la ubicación de robots original, la nueva disposición se muestra en la figura 3.3.6.

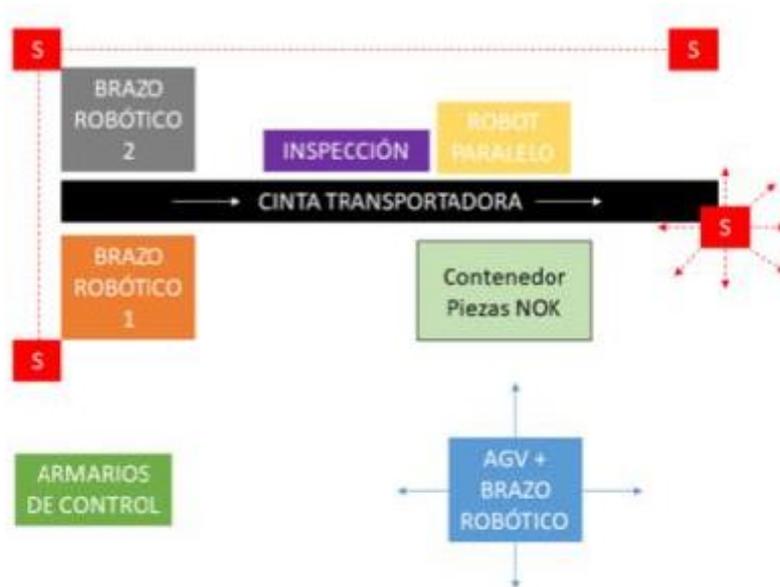


Figura 3.3.6. Configuración espacial modificada

A continuación, se resume el flujo de trabajo del proceso diseñado:

1. Un operario deposita bandejas en una mesa frente al robot, cada bandeja contiene las tres piezas que forman el dispositivo a ensamblar.
2. El brazo robótico 1 (LBR iiwa) establece una comunicación con una cámara auxiliar que observa de manera continua la mesa, para localizar las bandejas.
3. El iiwa toma una pieza superior y se la entrega al brazo robótico 2 (Yumi).
4. El iiwa toma una PCB y se la entrega al Yumi, depositandola sobre la pieza anterior.
5. Finalmente, el iiwa toma la carcasa inferior y la coloca sobre las piezas anteriores.
6. El Yumi utiliza su segundo brazo para recoger tornillos de un dispensador cercano y fijar con ellos el dispositivo.

7. Cuando el dispositivo está correctamente atornillado el Yumi lo coloca sobre la cinta transportadora.
8. El dispositivo pasa bajo el láser de control dimensional para asegurar un acabado correcto.
9. El robot paralelo (M-1iA) sacará la pieza de la cinta transportadora en caso de que el control dimensional no haya sido satisfactorio, en caso contrario la pieza llegará al final de la cinta transportadora, donde el robot móvil la recogerá y se la llevará a una zona habilitada para piezas correctamente procesadas.

3.4. HITO 3. Modelado del entorno y de la instalación.

ESCANEADO Y MODELADO DEL ENTORNO.

El lugar que se ha seleccionado para la instalación robótica se muestra en la figura 3.4.1, ubicado en el laboratorio de ligeros de la fundación.



Figura 3.4.1. Ubicación para la instalación robótica

Una vez seleccionada la ubicación para la instalación robótica es necesario realizar su modelado virtual.

Para simplificar el trabajo se ha empleado un escáner láser, el faro Focus3D X 130 HDR (figura 3.4.2).



Figura 3.4.2. Escáner láser Faro

El proceso seguido se puede dividir en tres bloques:

1. Escaneo 3D.

Con ayuda del láser 3D y un trípode (figura 3.4.3) se ha realizado el escaneo del entorno.

El láser realiza un barrido de 360° y, por tiempo de vuelo, es capaz de estimar la distancia de los objetos que lo rodean con una gran precisión.

La operación se ha realizado en varias ubicaciones para intentar reducir el número de zonas ocultas al máximo, estos escaneos se pueden unir fácilmente en el propio software del fabricante.



Figura 3.4.3. Escaneo del entorno

2. Procesado del escaneo.

Se ha empleado el software propio del fabricante, el faro SCENE [11].

Se importan los ficheros de cada uno de los escaneos realizados (figura 3.4.4).

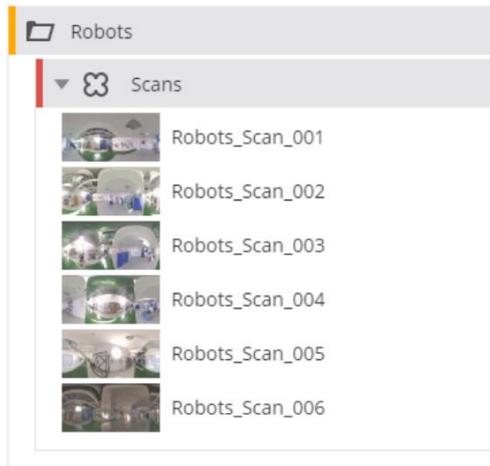


Figura 3.4.4. Archivos con los escaneos (SCENE)

El software es capaz de reconstruir el entorno a partir de los archivos anteriores (figura 3.4.5).



Figura 3.4.5. Reconstrucción del entorno (SCENE)

El escáner incorpora una cámara cuya información se emplea para asignar color a la nube de puntos, como se ve en la imagen.

También se ha usado el software para delimitar la zona de interés, eliminando con ello posibles puntos erróneos (figura 3.4.6).

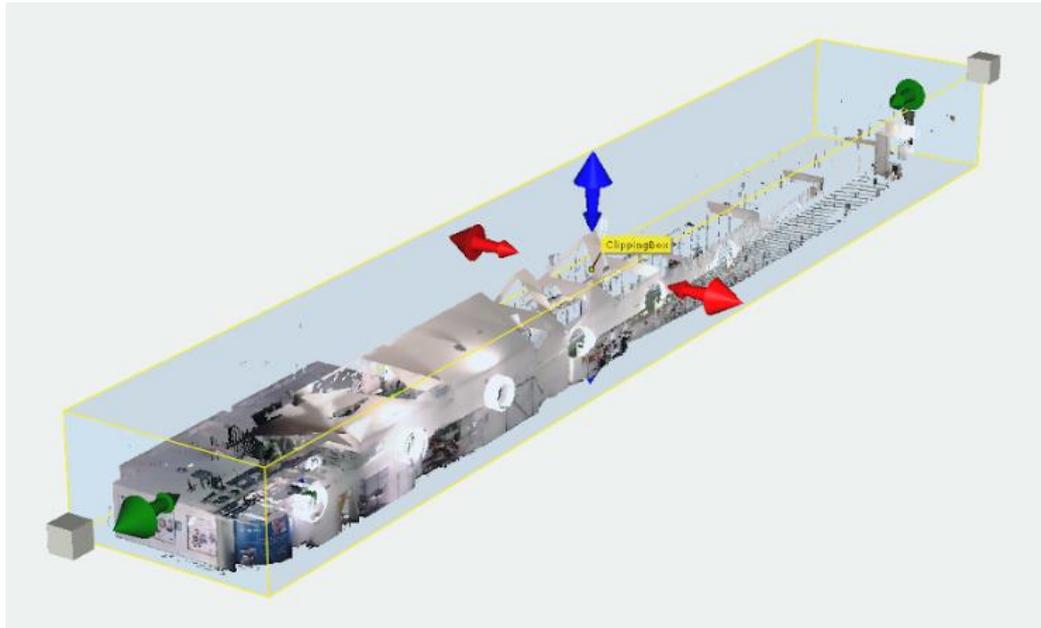


Figura 3.4.6. Clipping box (SCENE)

Finalmente, para reducir el número de puntos en la nube y poder trabajar de forma fluida en un software de modelado, se ha empleado la herramienta de software libre CloudCompare para el procesamiento de nube de puntos [12], el resultado se muestra en la figura 3.4.7.



Figura 3.4.7. Nube de puntos reducida (CloudCompare)

3. Modelado virtual.

Como se desea obtener una aplicación visual, donde no es necesario asegurar una precisión más allá de la del ojo humano, se va a emplear el software libre Blender [13], que entre otras muchas cosas permite modelar de forma rápida y sencilla.

Una vez se importada la nube de puntos en Blender se ha procedido a modelar sobre ella, en busca de un escenario lo más fiel a la realidad posible (figura 3.4.8).



Figura 3.4.8. Modelado sobre nube de puntos (BLENDER)

Blender permite dotar de foto-realismo a los modelos creados, en la figura 3.4.9 se muestra un renderizado rápido del modelo de la figura 3.4.8.



Figura 3.4.9. Laboratorio de ligeros (BLENDER)

Mediante un renderizado podemos generar imágenes fotorrealistas a partir de modelos tridimensionales, en base a los posibles caminos que toma la luz en la escena y las características de las normales sobre las que rebota, permitiendo simular los contornos de diversos materiales [14].

En la figura 3.4.10 se muestra el laboratorio real junto con el renderizado del modelo desarrollado.

No se han modelado los objetos de los que se va a prescindir cuando se instale la celda robótica.



Figura 3.4.10. Laboratorio real y renderizado (BLENDER)

MODELADO DE LA INSTALACIÓN ROBÓTICA.

- **UR5.**

El modelo en formato STEP puede descargarse de la página del fabricante.

Blender no trabaja con formato STEP por lo que se ha realizado una conversión previa de STEP a STL, el problema de estas conversiones es que no son demasiado buenas y los modelos generados tienen muchos puntos que no aportan información, y que tendrán un efecto adverso en la simulación (a más puntos tenga el modelo más puntos tendrá que mover la simulación y más computacionalmente costosa será).

Ha sido necesario un postprocesado para eliminar manualmente el mayor número de puntos de este tipo.

En la figura 3.4.11. se puede observar el modelo final, así como su renderizado tras añadir materiales en Blender.



Figura 3.4.11. Modelado UR5 (BLENDER)

- **LBR iiwa.**

El modelo en formato STEP se puede descargar de la página web de fabricante.

El modelo tras el postprocesado, junto a su renderizado puede observarse en la figura 3.4.12.

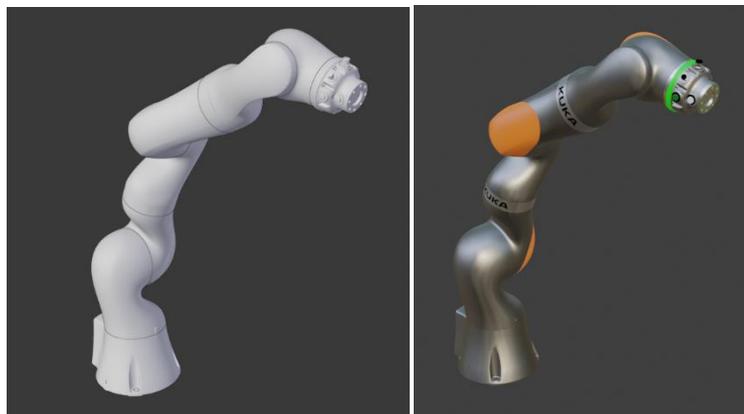


Figura 3.4.12. Modelado LBR iiwa (BLENDER)

- **Yumi.**

El fabricante proporciona el archivo STEP del robot.

El resultado tras el postprocesado puede observarse en la figura 3.4.13.

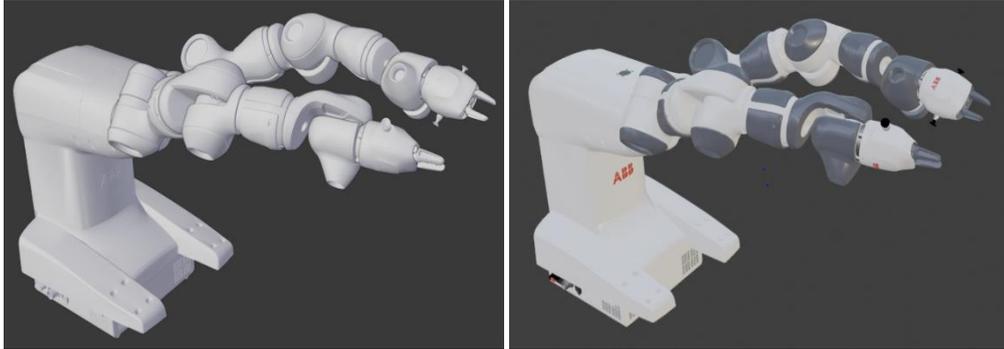


Figura 3.4.13. Modelado Yumi (BLENDER)

- **M-1iA.**

Fanuc no proporciona el modelo 3D para este robot, por lo que se ha modelado desde cero partiendo de las medidas de la hoja de características.

El resultado se muestra en la figura 3.4.14.

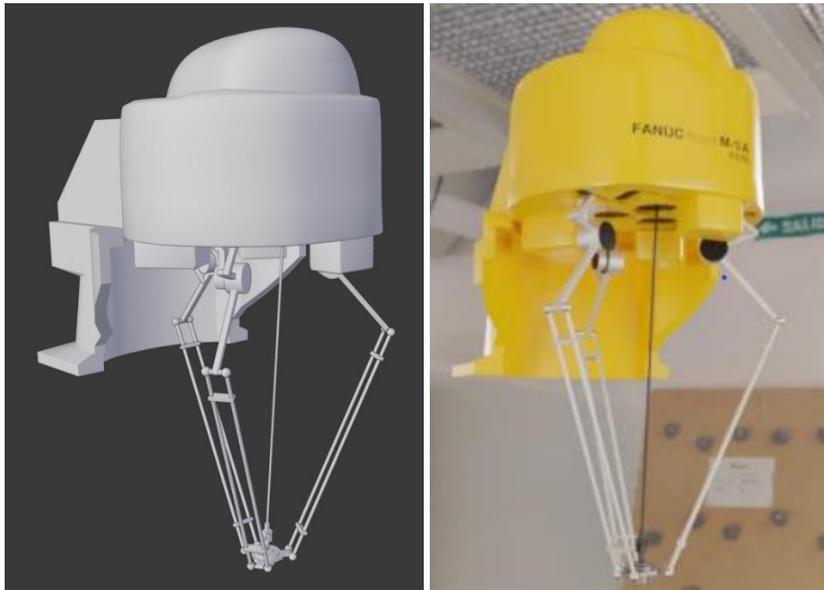


Figura 3.4.14. Modelado M-1iA

- **Summit XL Steel.**

El fabricante proporciona el modelo STEP, no obstante, debido a la mayor simplicidad visual del robot, se ha optado por comenzar a modelar desde cero, con la reducción de vértices que ello implica.

El resultado se puede observar en la figura 3.4.15.

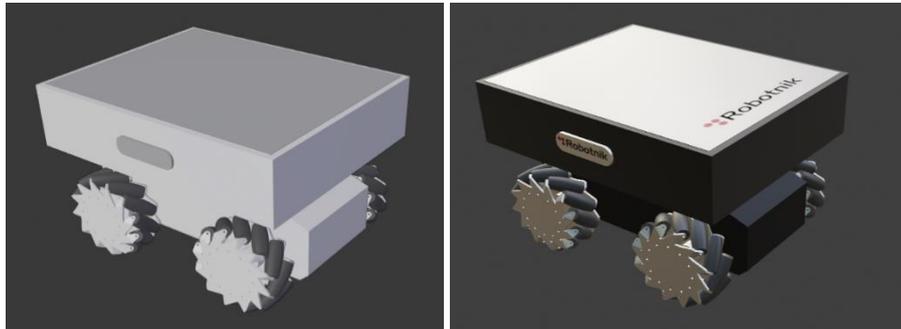


Figura 3.4.15. Summit XL Steel (BLENDER)

Como se pretende colocar el UR5 sobre este robot, se ha diseñado una plataforma para introducir la controladora, además, permite elevarlo a una posición óptima para los trabajos que se van a desarrollar.

El robot con la plataforma puede observarse en la figura 3.4.16.



Figura 3.4.16. Summit XL Steel con plataforma (BLENDER)

La instalación robótica cuenta con muchos más elementos, que se han introducido en los apartados previos.

Debido a la mayor simplicidad a la hora de modelar estos elementos se ha optado por mostrar el resultado final, cuyo renderizado puede observarse en la figura 3.4.17.



Figura 3.4.17. Renderizado de la célula robótica (BLENDER)

3.4. HITO 4. Simulación mediante realidad virtual.

En este apartado se muestra cómo obtener una simulación basada en realidad virtual con ayuda de los modelos obtenidos en el apartado anterior.

Se va a simular el demostrador 2 (colaboración persona-máquina), quedando la simulación del demostrador 3 (colaboración máquina-máquina) como posible mejora de futuro.

ESTUDIO CINEMÁTICO.

Para poder simular el comportamiento de los robots de la instalación se necesita desarrollar un programa que, conocido el punto que se desea alcanzar, sea capaz de posicionar cada elemento del robot en la posición correcta.

En el demostrador 2 los robots implicados son:

- *Summit XL Steel.*
- *UR5.*

- Summit XL Steel.

Este robot cuenta con cuatro ruedas de tipo mecanum [15], lo que lo convierte en un robot holonómico, es decir, puede moverse libremente en cualquier dirección del espacio definido por sus grados de libertad.

Gracias a ello se ha decidido simplificar su simulación haciendo uso de un algoritmo de búsqueda en grafos.

Se ha seleccionado uno de los algoritmos más empleados para tal fin, el algoritmo A* [16].

Para ello, se ha dividido la zona en la que el robot puede moverse en varios nodos, el objetivo del algoritmo es encontrar la ruta de menor coste entre el nodo en el que se encuentra el robot (nodo de origen), y el nodo donde se desea posicionar el robot (nodo de destino).

- **UR5**

Robot fijo de cadena cinemática abierta.

Para poder simular el movimiento del brazo robótico se necesita conocer:

- Su cinemática directa.
Permite conocer la posición del extremo del robot conocidos los ángulos que toma cada articulación.
- Su cinemática inversa.
Permite calcular el ángulo necesario en cada articulación para posicionar el extremo en un punto de interés.

Para la cinemática directa se ha seguido el método de Denavit-Hartenberg clásico [17].

El fabricante proporciona una posible tabla de Denavit-Hartenberg para sus robots, para el caso del robot estudiado toma la siguiente forma:

| | [°] | d [m] | a [m] | [°] |
|----------|-----|---------|-----------|-----|
| 1 | 0 | 0.08920 | 0 | 90 |
| 2 | 0 | 0 | - 0.42500 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | - 0.39225 | 0 |
| 4 | 0 | 0.11000 | 0 | 90 |
| 5 | 0 | 0.09475 | 0 | -90 |
| 6 | 0 | 0.08250 | 0 | 0 |

Esta tabla se puede alcanzar con la disposición de ejes mostrada en la figura 3.4.18.

Por simplicidad no se dibujan los ejes y_i que vienen dados por la regla de la mano derecha.

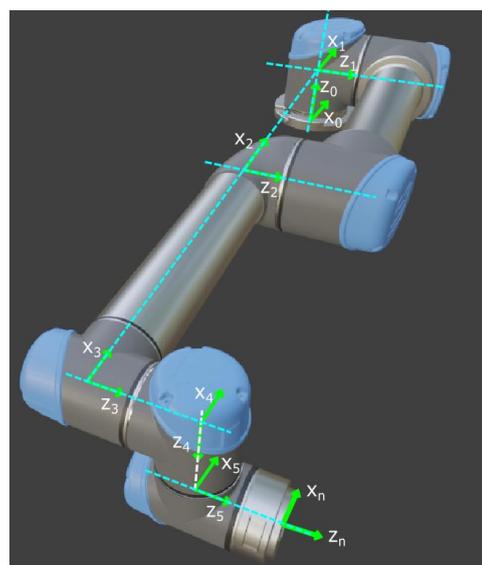


Figura 3.4.18. Disposición de ejes para cinemática directa

La cinemática directa queda por tanto definida al aplicar las respectivas transformaciones homogéneas entre el sistema de referencia de la base y de la herramienta:

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6$$

Donde cada una de las transformaciones entre sistemas de referencia adyacentes, suponiendo que se aplica el método de Denavit-Hartenberg clásico, toma la siguiente forma:

$${}^{n-1}T_n = \begin{bmatrix} \cos(\theta_n) & -\sin(\theta_n) \cos(\alpha_n) & \sin(\theta_n) \sin(\alpha_n) & a_n \cos(\theta_n) \\ \sin(\theta_n) & \cos(\theta_n) \cos(\alpha_n) & -\cos(\theta_n) \sin(\alpha_n) & a_n \sin(\theta_n) \\ 0 & \sin(\alpha_n) & \cos(\alpha_n) & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El caso de la cinemática inversa es algo más complejo que el caso estándar de un robot industrial de 6 grados de libertad ya que, debido a la configuración de este robot, no es posible desacoplar el problema de posicionamiento y orientación (ambos deben resolverse de forma conjunta).

Se ha seguido el procedimiento propuesto en [18], se va a reforzar el entendimiento del procedimiento con imágenes en base al modelo de Blender obtenido previamente.

- **Cálculo de θ_1 .**

Se parte de la posición del quinto sistema de referencia con respecto a la base, vector que denominamos 0P_5 (figura 3.4.19).

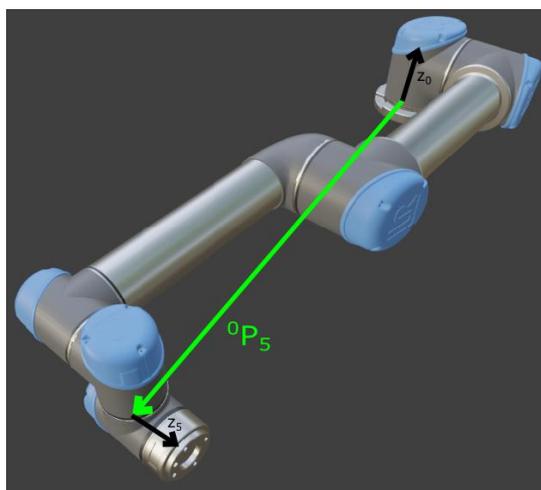


Figura 3.4.19. Quinto sistema de referencia respecto a la base

Para calcular 0P_5 nos apoyamos en la matriz de transformación homogénea que relaciona la base con el extremo del robot, 0T_6 (conocida ya que la cinemática inversa parte de la ubicación espacial deseada del extremo del robot).

Se puede obtener el quinto sistema de referencia desplazando el sexto sistema de referencia una cantidad de $-d_6$ unidades a lo largo de su dirección z_6 , como se observa en la figura 3.4.20.

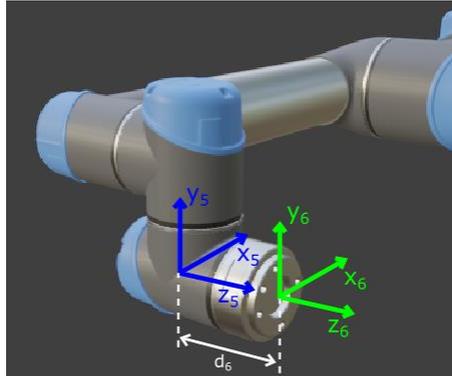


Figura 3.4.20. Quinto sistema de referencia partiendo del sexto

Matemáticamente esto se expresa como:

$${}^0P_5 = {}^0T_6 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d_6 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Al proyectar el vector 0P_5 en el plano que forman los ejes x-y del sistema de referencia de la base, es posible descomponerlo en los vectores mostrados en la figura 3.4.21, respecto dicho sistema de referencia.

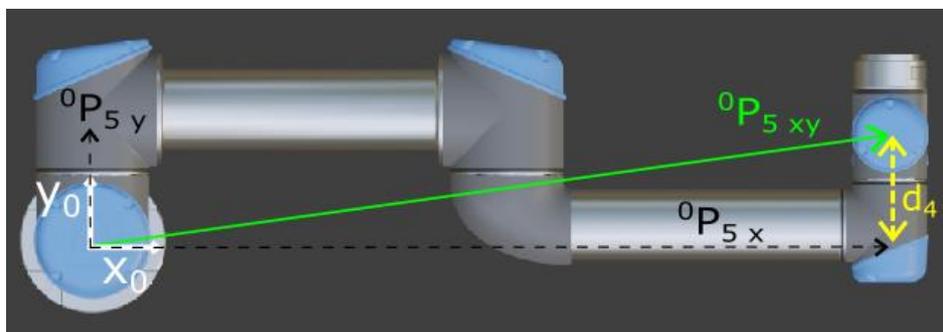


Figura 3.4.21. Descomposición del vector de posición

- **Cálculo de θ_5 .**

Se parte de la vista superior del robot mostrada en la figura 3.4.23, donde se relaciona el sexto sistema de referencia con el primer sistema de referencia.

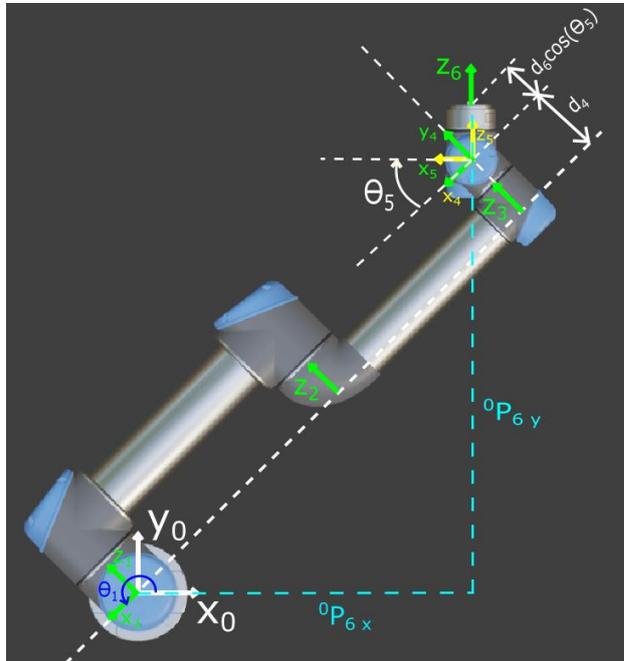


Figura 3.4.23. Ayuda para calcular el quinto ángulo

Puede extraerse la siguiente relación:

$$({}^1P_6)_z = d_6 \cos(\theta_5) + d_4$$

En base al valor de θ_1 calculado previamente:

$$({}^1P_6)_z = ({}^0P_6)_x \sin(\theta_1) - ({}^0P_6)_y \cos(\theta_1)$$

Por tanto:

$$\theta_5 = \pm \arccos\left(\frac{({}^1P_6)_z - d_4}{d_6}\right)$$

Las dos posibles soluciones se corresponden con:

- Muñeca hacia arriba.
- Muñeca hacia abajo.

- **Calcular θ_6 .**

Si se hace coincidir el origen de todos los sistemas de referencia en un mismo punto, z_1 puede expresarse respecto al sexto sistema de referencia como un vector unitario definido en coordenadas esféricas.

Las componentes x e y de dicho vector pueden encontrarse si se proyecta el vector sobre el plano "x-y", y seguidamente sobre cada uno de los ejes correspondientes.

La transformación entre el sexto sistema de referencia y el primer sistema de referencia puede encontrarse como:

$${}^1T_6 = \left(({}^0T_1)^{-1} {}^0T_6 \right)^{-1}$$

En base a la estructura de una matriz homogénea se deduce:

$$-\sin(\theta_6) \sin(\theta_5) = z_y$$

$$\cos(\theta_6) \sin(\theta_5) = z_x$$

De donde puede extraerse θ_6 como:

$$\theta_6 = \text{atan2} \left(\frac{-z_y}{\sin(\theta_5)}, \frac{z_x}{\sin(\theta_5)} \right)$$

Los valores de z_x y de z_y pueden obtenerse de la matriz homogénea 6T_1 (en base a la definición de la submatriz de rotación, dichos valores se corresponden con la primera y segunda componente de su tercera columna).

En vista de la ecuación anterior, si se cumple alguna de las siguientes condiciones:

$$\sin(\theta_5) = 0$$

$$z_x = 0$$

$$z_y = 0$$

el valor de θ_6 no está bien definido (soluciones infinitas).

Las tres articulaciones restantes se resuelven suponiendo que forman un manipulador 3R (tres articulaciones de rotación), figura 3.4.24.

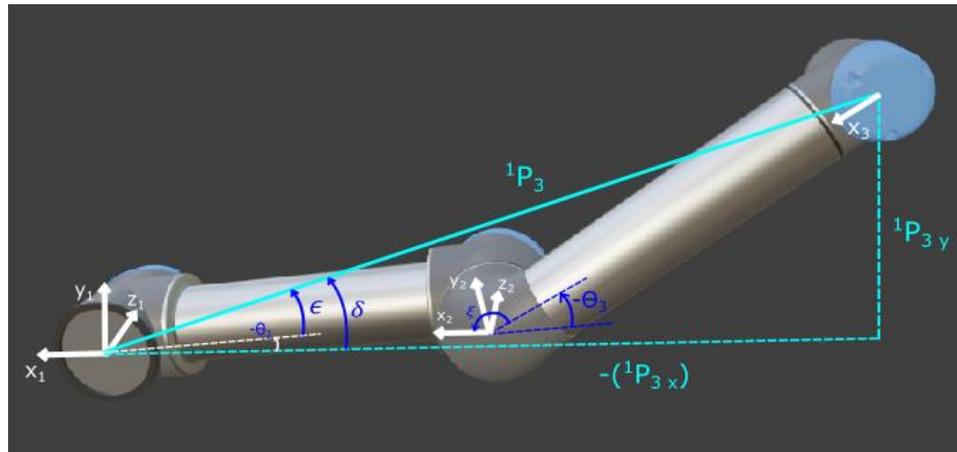


Figura 3.4.24. Ayuda para obtener los tres últimos ángulos

- **Cálculo de θ_3 .**

Se comienza buscando la ubicación del tercer sistema de referencia con respecto al primero.

$${}^4T = {}^6T {}^4T = {}^6T ({}^5T {}^6T)^{-1}$$

$${}^1P_3 = {}^4T \begin{bmatrix} 0 \\ -d_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Se puede plantear:

$$\cos(\xi) = \frac{\|{}^1P_3\| - a_2^2 - a_3^2}{2 a_2 a_3}$$

$$\cos(\xi) = -\cos(\pi - \xi) = -\cos(-\theta_3) = \cos(\theta_3)$$

De las dos ecuaciones previas se puede obtener el ángulo buscado:

$$\theta_3 = \pm \arccos\left(\frac{\|{}^1P_3\|^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3}\right)$$

Mientras el argumento del anterior arco-coseno se encuentre dentro del intervalo $[-1, 1]$, existirá solución para θ_3 .

- **Cálculo de θ_2 .**

De la figura 3.4.7 también se desprende la siguiente relación:

$$\theta_2 = -(\delta - \epsilon)$$

Donde:

$$\delta = \text{atan2}\left(\left({}^1P_3\right)_y, -\left({}^1P_3\right)_x\right)$$

Con ayuda de la ley de los senos:

$$\frac{\sin(\xi)}{\|{}^1P_3\|} = \frac{\sin(\epsilon)}{a_3}$$

Combinando las dos ecuaciones previas puede obtenerse el ángulo buscado.

$$\theta_2 = -\text{atan2}\left(\left({}^1P_3\right)_y, -\left({}^1P_3\right)_x\right) + \arcsin\left(\frac{a_3 \sin(\theta_3)}{\|{}^1P_3\|}\right)$$

Existen dos soluciones para θ_2 que se corresponden con las soluciones de codo arriba y codo abajo.

- **Cálculo de θ_4 .**

Se necesita encontrar la matriz de transformación entre el tercer y el cuarto sistema de referencia.

$${}^3T_4 = {}^3T_1 {}^1T_4 = \left({}^1T_2 {}^2T_3\right)^{-1} {}^1T_4$$

De la primera columna de la matriz homogénea anterior se deduce que:

$$\theta_4 = \text{atan2}(x_y, x_x)$$

Atendiendo a la cinemática inversa desarrollada, pueden obtenerse un total de ocho posibles soluciones para alcanzar una determinada configuración espacial, esto se debe a la posibilidad de alcanzar dicha solución con:

- El hombro a derecha o a izquierda.
- El codo arriba o abajo.
- La muñeca arriba o abajo.

Se ha comprobado la validez de las ecuaciones cinemáticas planteadas con ayuda del software libre Octave [19].

El código implementado se adjunta como documento anexo, permite:

1. Resolver la cinemática directa.
2. Resolver la cinemática inversa.
3. Planificar trayectorias entre posiciones.

En la figura 3.4.25 se muestra una prueba de trayectoria lineal entre dos posiciones con el código desarrollado.

$$Posición\ inicial = \begin{bmatrix} -0.81725 \\ -0.19250 \\ -0.00555 \\ 0 \\ 0 \\ 90 \end{bmatrix}$$

$$Posición\ final = \begin{bmatrix} -0.81725 \\ -0.19250 \\ -0.00555 \\ 0 \\ 0 \\ 90 \end{bmatrix}$$

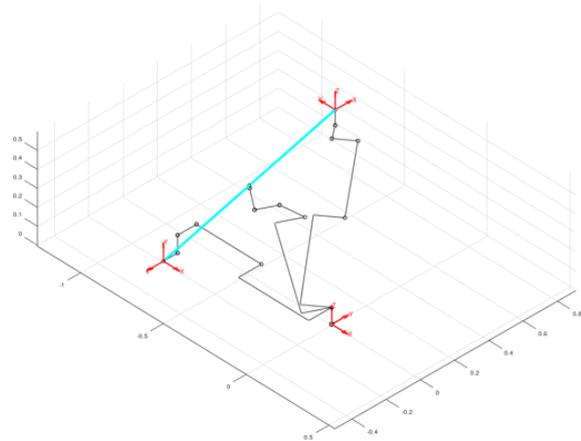


Figura 3.4.26. Trayectoria lineal con Octave

SOFTWARE DE SIMULACIÓN.

Para crear la aplicación de realidad virtual se ha empleado Unity 3D [20].

Todos los modelos desarrollados en Blender se han pasado a Unity, donde se han vuelto a texturizar como puede observarse en la figura 3.4.26.

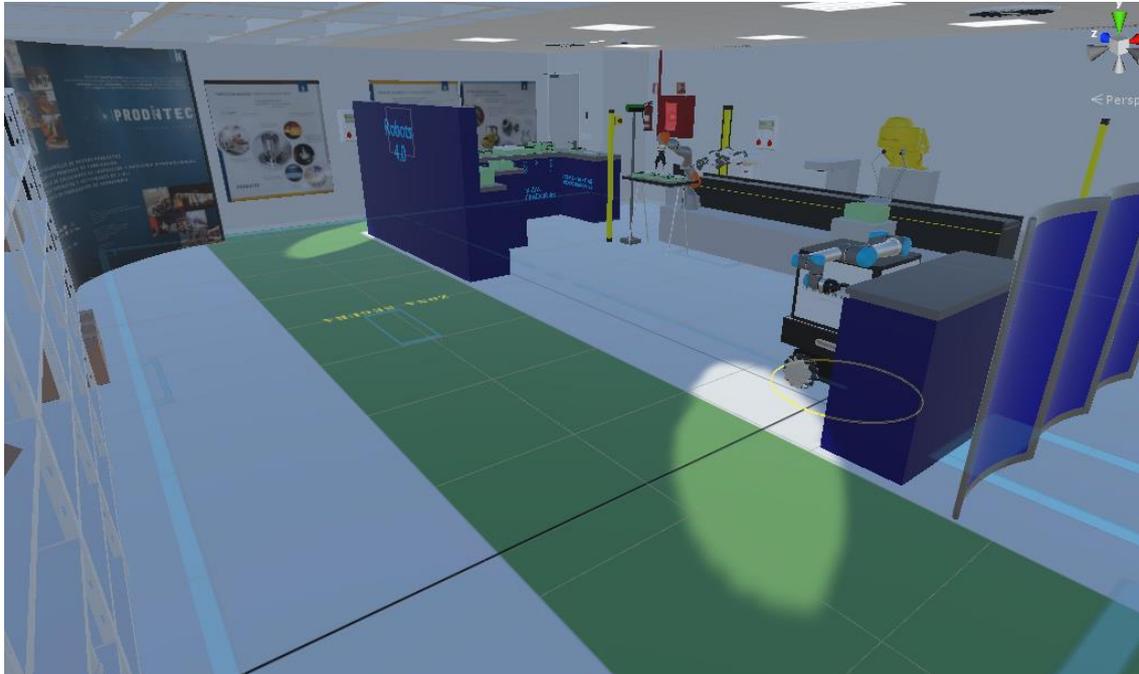


Figura 3.4.26. Modelos en Unity 3D

Unity renderiza en tiempo real por lo que el resultado puede parecer menos sorprendente que el renderizado mostrado con Blender, no obstante, esto queda compensado con el uso de la realidad virtual, que ayuda al usuario a percibir el escenario como su nueva realidad.

Para mover el brazo robótico en Unity, partiendo del modelo de Blender, se ha seguido el siguiente procedimiento:

- Calcular las ecuaciones cinemáticas (generalmente en robótica se trabaja con la regla de la mano derecha).
- En Blender, colocar el origen de cada eslabón de acuerdo con los sistemas de referencia seleccionados para la cinemática directa.
- Pasar el modelo a Unity.
- A la hora de programar los scripts de C# en Unity hay que tener en cuenta dos consideraciones:
 1. Unity trabaja con la regla de la mano izquierda.
 2. Al importar modelos en Unity es posible que la escala del modelo cambie (hay que tenerlo en cuenta en el script).

DISEÑO DE LA APLICACIÓN.

La aplicación de realidad virtual se ha desarrollado con las gafas HTC Vive.

La interacción mediante realidad virtual se ha programado en base a la librería “SteamVR”.

Aunque el objetivo de la aplicación es la simulación de procesos, se ha creado una aplicación algo más completa que permite al usuario familiarizarse con la realidad virtual, con el entorno donde se ubica la instalación robótica, y con los diferentes robots de la instalación.

La aplicación se ha dividido en varias escenas:

- Welcome.
- Home.
- Tutorial.
- Robotnik
- UR
- Kuka
- ABB
- Fanuc
- labWithoutRobots
- labWithRobots

La escena “Welcome” tiene como propósito realizar una configuración inicial referente a todas las demás escenas, cuando termina carga automáticamente la escena “Home”, que es la escena que se emplea para permitir al usuario enlazar con todas las demás.

Desde la escena “Home” el usuario puede iniciar:

1. Un tutorial.
2. Las escenas para probar las cinemáticas de los robots (“Robotnik”, “UR”, “Kuka”, “ABB” y “Fanuc”).
3. Visitar el laboratorio sin célula robótica (“labWithoutRobots”).
4. Visitar el laboratorio con célula robótica (“labWithRobots”).

Donde se encuentra la simulación del proceso desarrollado.

Se ha habilitado un botón en el controlador que permite al usuario regresar en cualquier momento a la escena “Home”.

A continuación, se muestran cada una de las escenas de forma más detallada.

- Welcome

Escena auxiliar para crear una instancia “Player” común a todas las escenas de la aplicación (permite al usuario entrar en la realidad virtual), inmediatamente después da paso a la escena “Home”.

- Home

En esta escena el usuario aparece en una sala (virtual) idéntica a la sala en la que se encuentra (real), con la idea de introducir a los usuarios en la realidad virtual de forma paulatina.

Este modelo se ha tomado de una librería de la empresa.

En la figura 3.4.27 se puede observar la sala real y en la figura 3.4.28 la sala virtual donde aparece el usuario.

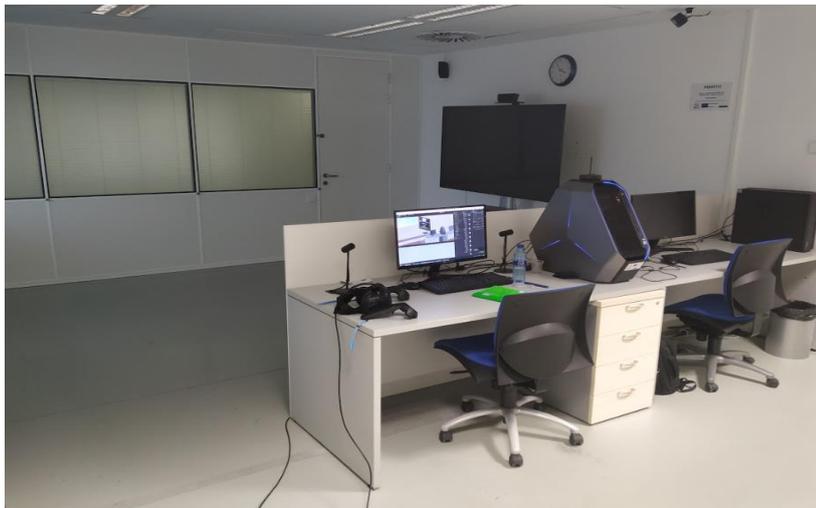


Figura 3.4.27. Sala de realidad virtual

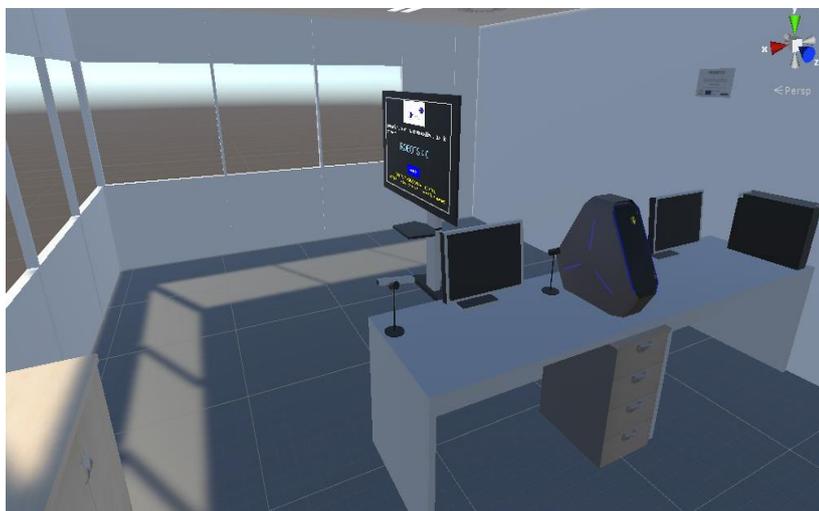


Figura 3.4.28. Sala de realidad virtual modelada

La televisión de pantalla plana permite al usuario navegar entre los distintos escenarios, se ha modificado su posición con respecto a la original para evitar que el usuario choque con ella.

El menú introductorio se muestra en la figura 3.4.29.

Para avanzar el usuario debe acercar su mando al botón “COMENZAR” y pulsar el gatillo de cualquiera de los controladores.



Figura 3.4.29. Home: introducción

Lo siguiente que aparece es el menú de selección de escenario (figura 3.4.30). Todas las opciones desencadenan en una nueva escena, salvo la opción “ROBOTS” que abre un nuevo submenú.



Figura 3.4.30. Home: selección

En el siguiente punto se explica cómo interactuar con objetos.

A la espalda del usuario aparece una mesa con objetos que puede agarrar y lanzar (figura 3.4.33).



Figura 3.4.33. Tutorial: Agarrar objetos

El siguiente punto introduce el teletransporte, el mecanismo seleccionado para desplazarse dentro de la simulación para evitar mareos en el usuario.

La mesa del punto anterior se desplaza a una ubicación que el usuario no puede alcanzar caminando (supera las dimensiones de la sala donde se encuentra), la única forma de acercarse a la mesa e interactuar con los objetos que se encuentran sobre ella es hacer uso del teletransporte (figura 3.4.34).



Figura 3.4.34. Tutorial: teletransporte

Finalmente se indica al usuario que puede volver al menú inicial en cualquier momento pulsando un botón determinado del controlador (figura 3.4.35).

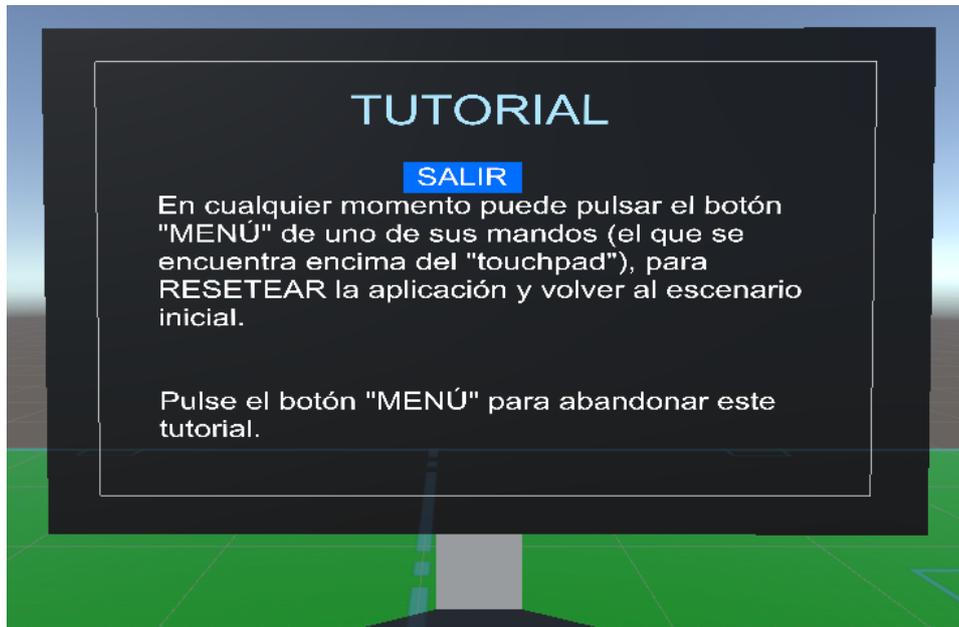


Figura 3.4.35. Tutorial: salir

- Robotnik.

En esta escena el usuario aparece en un entorno que permite probar el algoritmo A* del robot móvil (figura 3.4.36).

El usuario puede teletransportarse y generar cubos con los que interactuar.

El robot seguirá al usuario evitando chocar con los cubos.

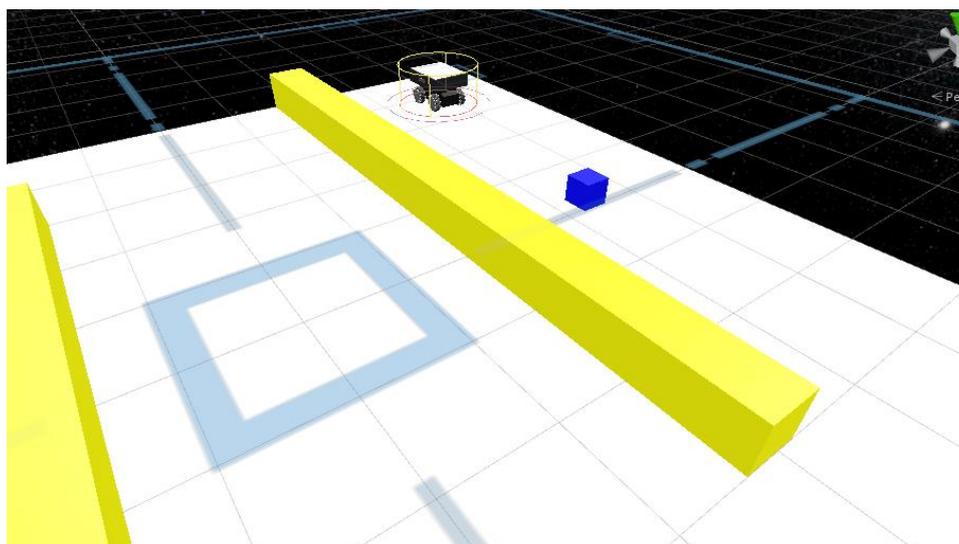


Figura 3.4.36. Escenario de prueba: robot móvil

- UR.

Esta escena permite probar las cinemáticas del UR5.

Para reducir al máximo los distractores se ha colocado el robot flotando delante del usuario, con un “skybox” de la vía láctea (figura 3.4.37).

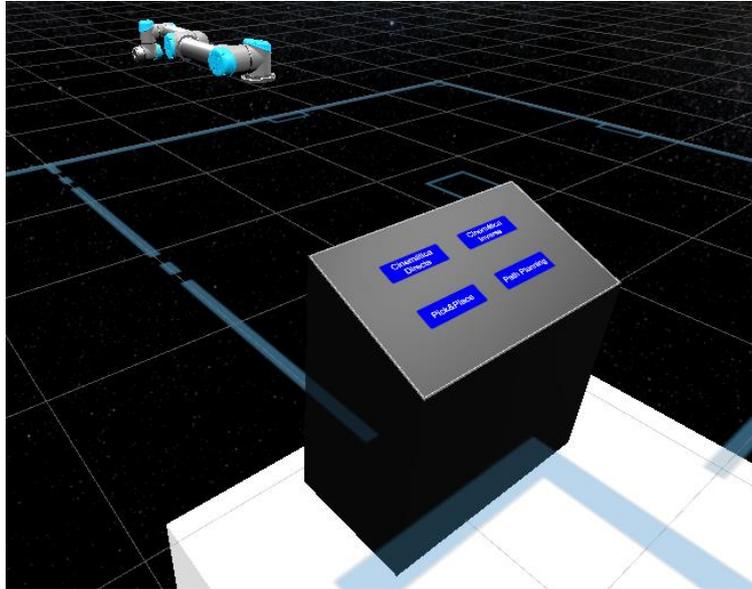


Figura 3.4.37. Escenario de pruebas: UR5

El usuario tiene acceso a un panel con las siguientes opciones:

- Cinemática directa (figura 3.4.38).

En el panel aparecen una serie de deslizadores, uno por cada articulación del robot, que permiten simular el movimiento de cada uno de los motores.

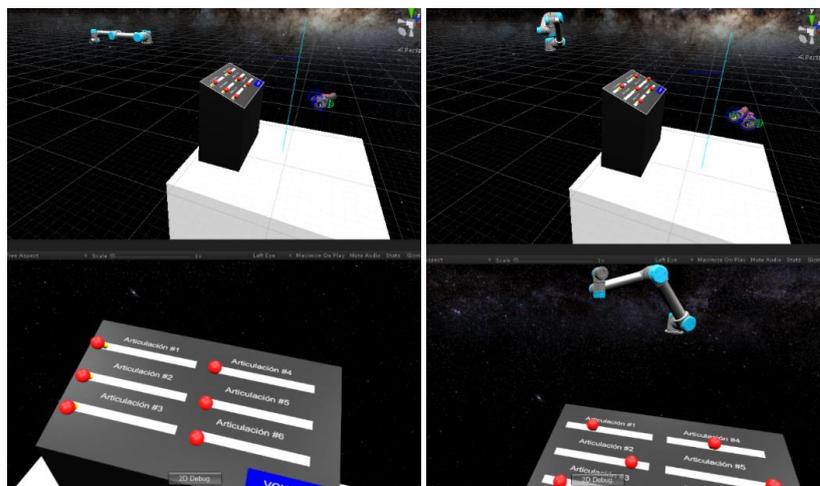


Figura 3.4.38. Escenario de pruebas UR5: cinemática directa

- Cinemática inversa (figura 3.4.39).

En el panel aparecen una serie de deslizadores que permiten posicionar un sistema de referencia auxiliar.

Cuando el sistema de referencia se encuentra en un punto alcanzable por el robot la configuración del brazo robótico se modifica, de forma que su extremo toca el sistema de referencia. En el panel también se puede modificar la orientación con la que el extremo del robot toca el sistema de referencia.

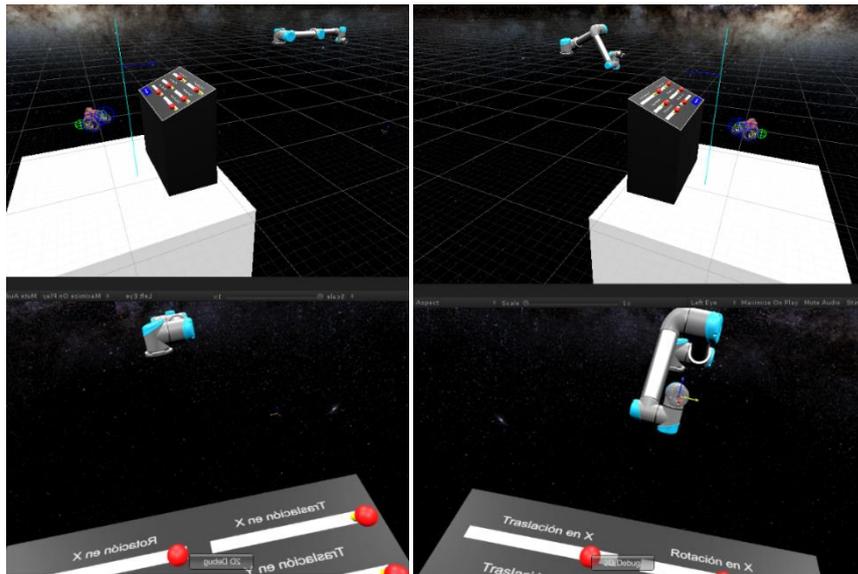


Figura 3.4.39. Escenario de pruebas UR5: cinemática inversa

- Pick&Place (figura 3.4.40).

Para mejorar el entendimiento de la cinemática directa.

El usuario tendrá que colocar el robot en una configuración que le permita coger la pieza, cuando esté en posición el usuario debe cerrar la pinza e introducir la pieza en una caja habilitada a tal fin.

Si el robot roza la pieza antes de recogerla la pieza saldrá volando, lo que añade algo más de dificultad a la prueba.

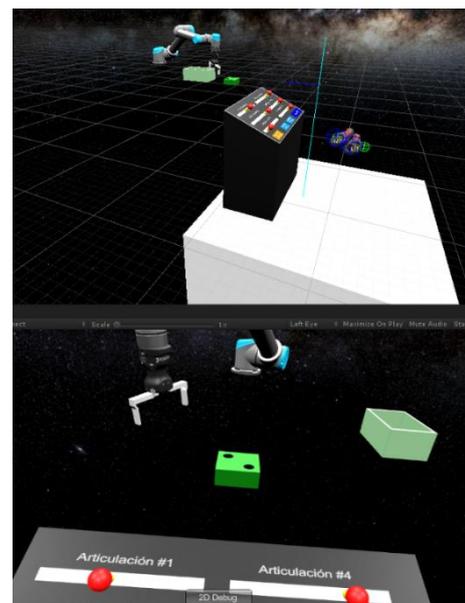


Figura 3.4.40. Escenario de pruebas UR5: Pick&Place

- Path Planning (figura 3.4.41).
Permite generar trayectorias para el robot entre dos puntos de interés. En el panel aparecen una serie de deslizadores que permiten colocar los puntos de inicio y fin en el espacio tridimensional. Además, se han añadido unos cuadros de texto para indicar los grados de roll, pitch y yaw con los que el robot debe alcanzar cada posición.

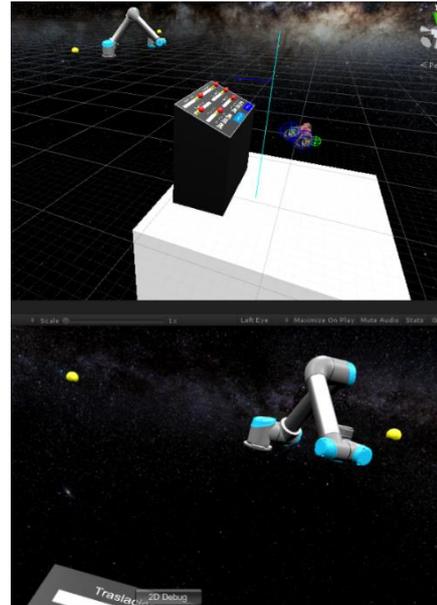


Figura 3.4.41. Escenario de pruebas UR5: Path Planning

- Kuka.
Escenario de pruebas para el LBR iiwa (figura 3.4.42).

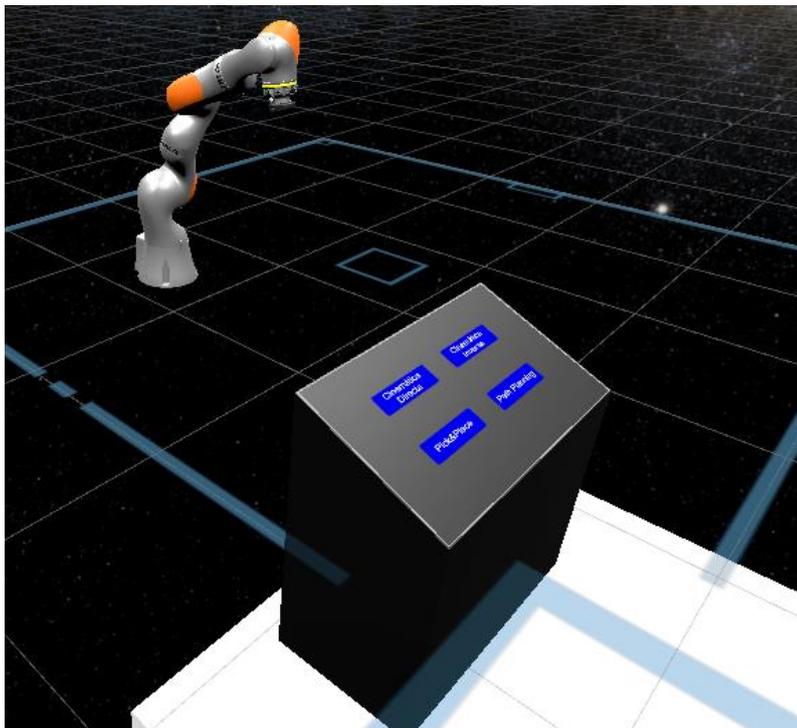


Figura 3.4.42. Escenario de pruebas: iiwa

- ABB.

Escenario de pruebas para el Yumi (figura 3.4.43).

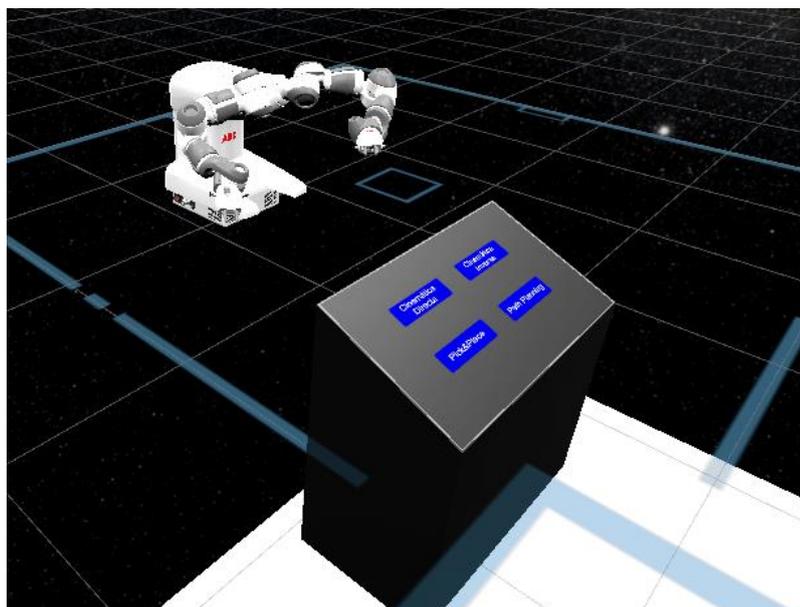


Figura 3.4.43. Escenario de pruebas: Yumi

- Fanuc.

Escenario de pruebas para el robot delta (figura 3.4.44).

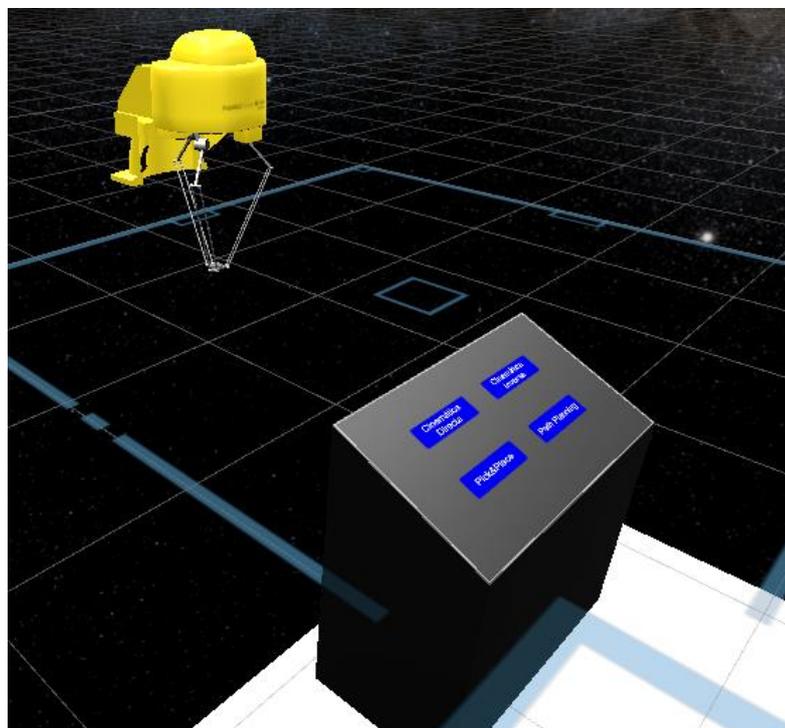


Figura 3.4.44. Escenario de pruebas: delta

- labWithoutRobots.

Se ha incluido este escenario para que el usuario pueda comparar el laboratorio antes y después de la instalación (figura 3.4.45).



Figura 3.4.45. Laboratorio sin célula robótica

- labWithRobots.

Escenario principal (figura 3.4.46).

Sobre él se ha desarrollado la simulación del demostrador 2 (colaboración persona-máquina).

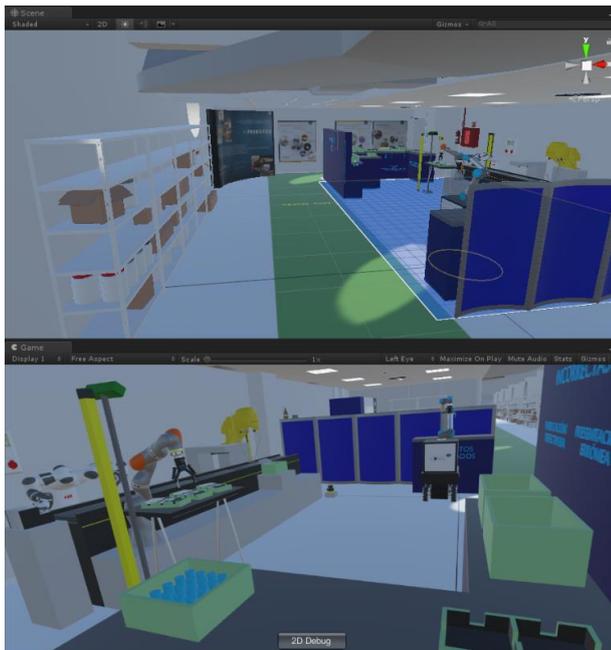


Figura 3.4.46. Laboratorio con célula robótica

SIMULACIÓN DE PROCESOS.

Cuando el usuario accede al laboratorio con la instalación robótica es ubicado en el punto de trabajo del operario de la futura instalación.

Tiene acceso a:

- Una mesa donde puede recoger la materia prima.
- Una mesa de trabajo donde se produce la colaboración.
- Una pantalla que lo guía a lo largo del proceso.

Para mostrar el proceso simulado se van a emplear imágenes tomadas mientras se evaluaba la aplicación desarrollada con un usuario real (todos los scripts de la aplicación se han programado en C#).

Para comenzar el usuario debe seleccionar una simulación (figura 3.4.47).

- Demostrador 2. Colaboración hombre-máquina.
- Demostrador 3. Colaboración máquina-máquina.



Figura 3.4.47. Selección de simulación (prueba con usuario real)

En este trabajo se cubre el demostrador 2, quedando la simulación del demostrador 3 como mejora de futuro.

Se introduce al usuario a la robótica colaborativa (figura 3.4.48).

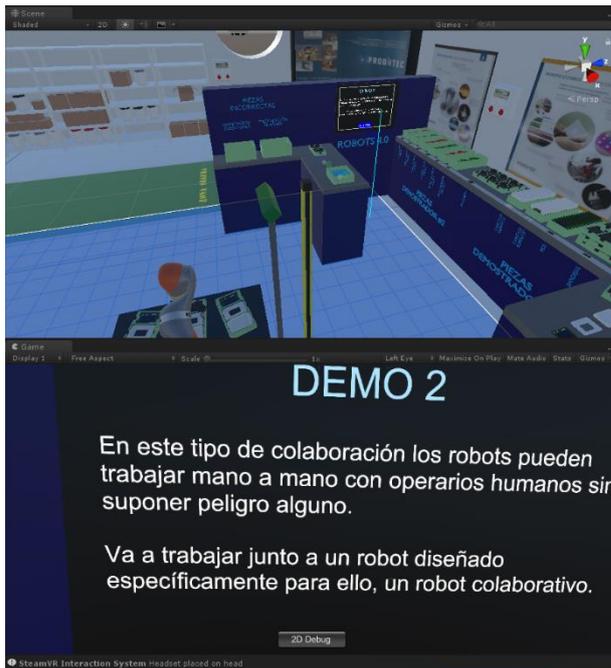


Figura 3.4.48. Introducción a la robótica colaborativa (prueba con usuario real)

Mientras, el robot se aproxima a la mesa de trabajo y se posiciona sobre el buffer de dos posiciones para poder analizar las piezas que el usuario introduzca en él (figura 3.4.49).



Figura 3.4.49. Robot aproximándose (prueba con usuario real)

Cuando el robot está listo el usuario puede continuar con la simulación. En la siguiente pantalla se introduce el proceso que se va a realizar (figura 3.4.50).



Figura 3.4.50. Introducción al proceso (prueba con usuario real)

Se le indica al usuario que debe colocar una bandeja sobre la mesa de trabajo para poder situar las piezas sobre ella (figura 3.4.51).

Las bandejas se encuentran en la mesa con las materias primas.



Figura 3.4.51. Reposición de bandejas (prueba con usuario real)

El usuario debe introducir las piezas que se le irán indicando en el buffer de dos posiciones (figura 3.4.52).



Figura 3.4.52. Introducción al buffer de dos posiciones (prueba con usuario real)

Para la simulación se ha escogido un lote con una pieza de cada tipo:

1. Pieza circular roja.
2. Pieza circular verde.
3. Pieza cuadrada roja.
4. Pieza cuadrada verde.
5. Pieza triangular roja.
6. Pieza triangular verde.

No obstante, puede simularse cualquier otro lote fácilmente.

En primer lugar, debe introducir una pieza circular roja.

En la figura 3.4.53 puede observarse el procedimiento.

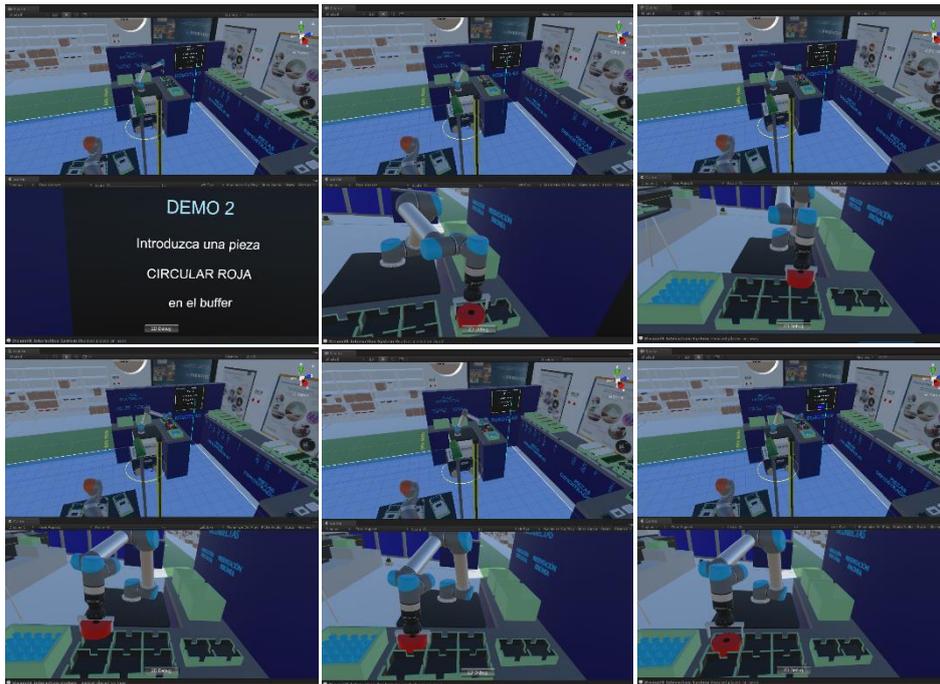


Figura 3.4.53. Colocando pieza circular roja (prueba con usuario real)

La siguiente pieza a introducir es una pieza circular verde.

En la figura 3.4.54 puede comprobarse que, si en el buffer se encuentran dos piezas distintas, el cobot es capaz de seleccionar la pieza correcta.



Figura 3.4.54. Colocando pieza circular verde (prueba con usuario real)

El mismo procedimiento mostrado con las piezas circulares se repite para las piezas cuadradas y las piezas triangulares.

Cuando la bandeja se llena de piezas el robot se posiciona sobre ella esperando a que el usuario introduzca todas las tapas (figura 3.4.55)



Figura 3.4.55. Colocar tapas (prueba con usuario real)

Cuando todas las tapas han sido introducidas correctamente se podrá avanzar en la simulación (3.4.56).



Figura 3.4.56. Tapas colocadas correctamente (prueba con usuario real)

Para finalizar el cobot recoge la bandeja y se la lleva a otra zona de la instalación (figura 3.4.57).



Figura 3.4.57. Robot retirando el lote (prueba con usuario real)

Pueden producirse dos situaciones que alteran el flujo de trabajo mostrado:

1. Algunas de las piezas se han modelado con dimensiones incorrectas.

Si el cobot detecta una de estas piezas la llevará a un contenedor de piezas a desechar (figura 3.4.58).

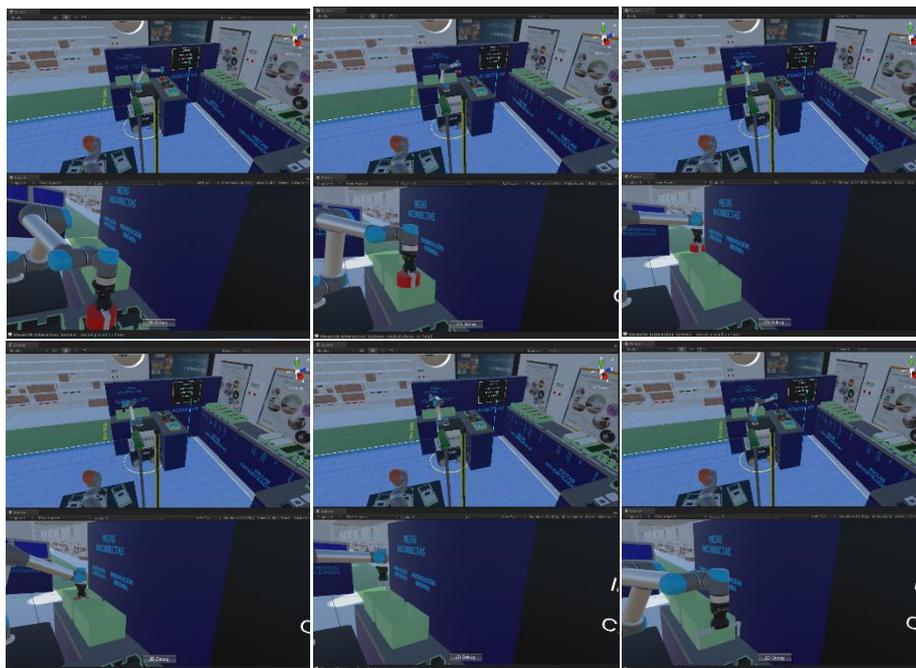


Figura 3.4.58. Pieza dimensionalmente errónea (prueba con usuario real)

2. Si ninguna de las piezas del buffer se corresponde con la pieza que debe introducirse en la bandeja, el robot sacará una de las piezas del buffer y la llevará a un contenedor de piezas mal presentadas (se da prioridad a la pieza que no vaya a ser usada en el lote o se use más tarde), puede verse un ejemplo en la figura 3.4.59.



Figura 3.4.59. Pieza mal presentada (prueba con usuario real)

4

PRUEBAS DE SOFTWARE

Para poder comprobar si el software desarrollado está libre de defectos y cumple con los requisitos propuestos es común realizar diversas pruebas, en este capítulo se recogen las pruebas que se han llevado a cabo para validar la aplicación.

4.1. PRUEBAS CON USUARIOS.

Para poder mejorar la aplicación de cara a los usuarios finales es importante realizar pruebas con usuarios ajenos a su desarrollo y, con ello, evitar al máximo trabajar en base a opiniones sesgadas [22].

La aplicación desarrollada en este trabajo se encuentra en una primera versión sobre la que se pretende seguir trabajando, por lo que las pruebas realizadas tienen como objetivo, además de comprobar que se han cumplido los requisitos iniciales, poder extraer información útil que permita mejorar la experiencia de usuario de cara a una futura versión.

Las pruebas se han llevado a cabo en un entorno controlado con el desarrollador como observador (pruebas alfa).

Al ser la realidad virtual una tecnología novedosa en este campo de aplicación, aún no existe un procedimiento estandarizado para validar la aplicación.

La información se ha extraído en base a:

- La observación directa del usuario.
- La interacción verbal con el usuario.
- Un breve cuestionario final.

Para las pruebas se ha seleccionado un grupo de varias personas de diferente sexo, edad y complejión, así como diferente experiencia en el uso de entornos de realidad virtual (figura 4.1.1).



Figura 4.1.1. Pruebas con usuarios

Para garantizar la seguridad de los usuarios se han eliminado todo tipo de obstáculos de la sala, además, se ha tenido especial cuidado a la hora de configurar el espacio de trabajo, de forma que si el usuario se aproxima a los límites pueda conocer su posición real.

Existe un efecto adverso bastante común relacionado con la realidad virtual, muy parecido a la cinetosis, que suele presentarse con más probabilidad en personas que nunca han tenido contacto con esta tecnología.

Puede provocar náuseas, fatiga, dolor de cabeza, desorientación, vértigo..., por tanto, se ha comunicado a los usuarios la posibilidad de parar la simulación en cualquier momento en caso de sentir alguno de estos efectos adversos sobre su salud.

El cuestionario seleccionado para evaluar la aplicación se ha tomado de [22], las preguntas, así como el objetivo de cada una, se muestran a continuación:

1. ¿Has sentido algún tipo de malestar durante o después de la experiencia?

Si usuarios con experiencia previa en realidad virtual responden afirmativamente a esta pregunta será necesario estudiar si la aplicación es lo suficientemente fluida.

2. ¿Has sentido la sensación de presencia y la sensación de que los eventos realmente estaban sucediendo?

Pregunta muy interesante si se tiene en cuenta que el objetivo del trabajo es obtener una simulación inmersiva.

3. ¿Has sentido la ilusión de estar en las instalaciones reales?

Para conocer si el modelado del entorno es satisfactorio.

4. ¿Son los colores y texturas similares a los reales?

Para conocer si se ha realizado un texturizado satisfactorio.

5. ¿Son apropiados los efectos de iluminación?

Para conocer si la iluminación seleccionada es realista.

6. ¿Se mueven los robots como uno real?

Importante para que la simulación con robots sea inmersiva.

7. ¿Ha percibido algún riesgo?

Para extraer conclusiones acerca del potencial de la realidad virtual en simulaciones industriales.

8. ¿Es útil estar virtualmente dentro del laboratorio y poder moverse?

Para extraer conclusiones acerca del potencial de la realidad virtual en simulaciones industriales.

9. ¿Es la aplicación usable y amigable?

Para ayudar al desarrollador a mejorar la aplicación de cara a versiones futuras.

10. ¿Es fácil manejar el robot con la interfaz virtual?

Para conocer el potencial de la realidad virtual en simulaciones robóticas.

11. ¿Considera que la aplicación ahorra tiempo, ya que puede usarse para entrenar, simular y controlar?

Para extraer conclusiones acerca del potencial de la realidad virtual en simulaciones industriales.

4.2. CONCLUSIONES.

Respuestas al cuestionario:

| Pregunta | Respuesta afirmativa | Respuesta negativa |
|----------|----------------------|--------------------|
| 1 | 25% | 75% |
| 2 | 100% | 0% |
| 3 | 100% | 0% |
| 4 | 75% | 25% |
| 5 | 100% | 0% |
| 6 | 100% | 0% |
| 7 | 0% | 100% |
| 8 | 100% | 0% |
| 9 | 100% | 0% |
| 10 | 100% | 0% |
| 11 | 100% | 0% |

En base a las pruebas realizadas y el posterior cuestionario se concluye que:

- La aplicación es fluida.
El usuario que ha reportado cierto mareo durante la simulación no contaba con experiencia previa en esta tecnología.
- La aplicación es inmersiva.
Pese a que un usuario ha notado ciertas texturas poco realistas, todos han aceptado el nuevo entorno como su nueva realidad.
- Los movimientos de los robots son realistas y su manejo es intuitivo.
- Ningún usuario reportó sensación de riesgo durante la simulación, importante ya que se simula un trabajo junto a un robot colaborativo.
- Los usuarios han encontrado un gran potencial en el uso de la realidad virtual para diversas aplicaciones industriales.

En base a la observación de los usuarios durante las pruebas y la comunicación con el desarrollador se concluye que:

- Los usuarios menos experimentados han tenido algún problema con el cable de las gafas, por lo que ha sido necesario ayudarles para evitar tropiezos.
- Se ha valorado positivamente el desarrollo de una aplicación en torno a la simulación que permite familiarizarse con el uso de la realidad virtual, así como con el entorno y la célula robótica.
- Algún usuario ha presentado problemas a la hora de identificar ciertos botones en los controladores de los mandos, siendo necesaria una comunicación verbal.
- Todos los usuarios han mostrado un gran interés por la tecnología y consideran que tiene un gran potencial en el entorno industrial.

En base a las pruebas realizadas se concluye que para la siguiente versión de la aplicación es necesario:

1. Mejorar ciertas texturas.
2. Ayudar al usuario a identificar los botones del controlador con más facilidad.

5

CONCLUSIÓN FINAL

Las simulaciones basadas en computador cuentan con una gran implantación en el entorno industrial, no obstante, la realidad virtual aún no ha entrado de lleno en el sector. Según Gartner la realidad virtual se encuentra en el abismo de desilusión (figura 5.1), por lo que habrá que esperar unos años para conocer su verdadero potencial en industria (en el gráfico se estiman entre 5 y 10 años).

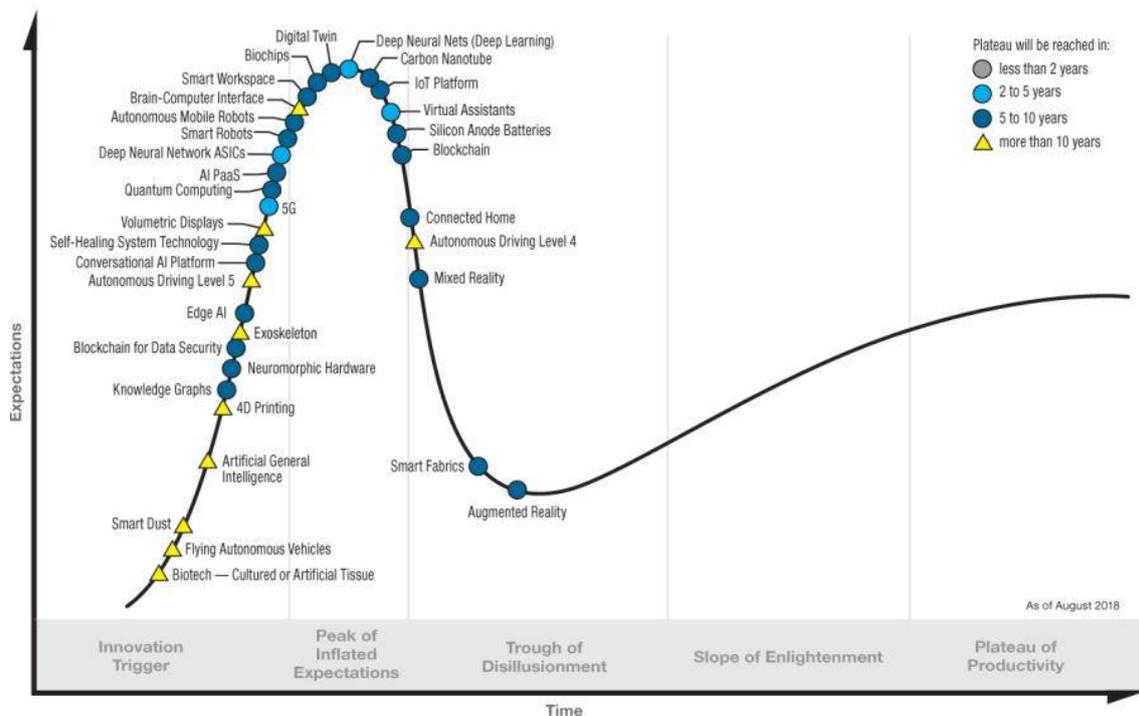


Figura 5.1. Tecnologías emergentes

Gracias al gran abanico de posibilidades que ofrece la realidad virtual (simulación de procesos, entrenamiento de personal, asistencia técnica, ...), unido a la creciente implantación de tecnologías como el gemelo digital o la robótica colaborativa, se espera un incremento del uso de la realidad virtual en industria.

El submenú se muestra en la figura 3.4.31.

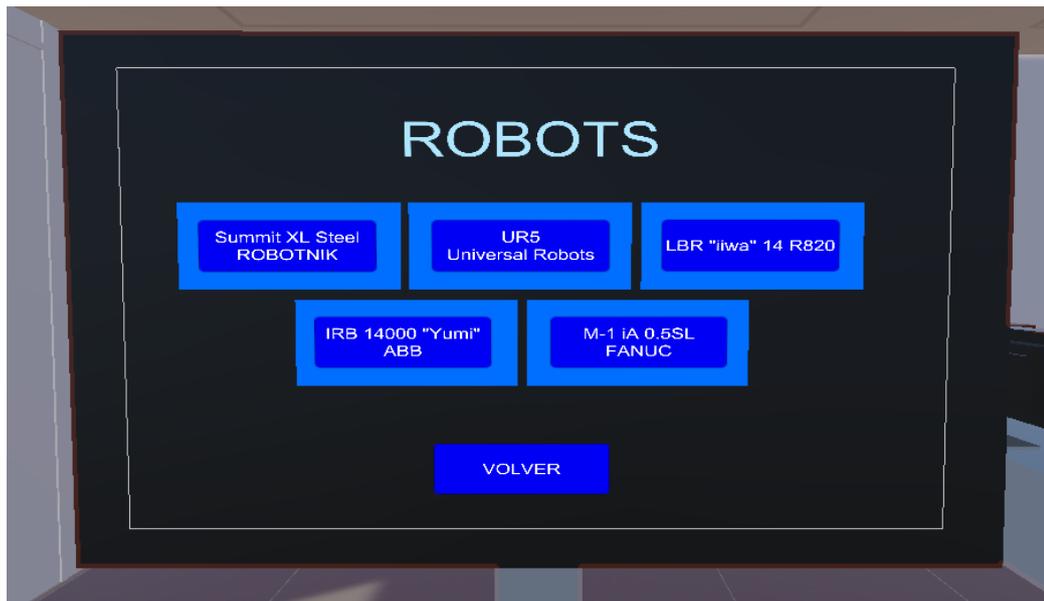


Figura 3.4.31. Home: submenú cinemáticas

Se ha habilitado un botón en los mandos que permite regresar a esta escena en cualquier momento.

- Tutorial

Lleva al usuario a una nueva escena donde podrá familiarizarse con acciones propias de la realidad virtual empleadas en la simulación.

En primer lugar, se repasan brevemente los botones (figura 3.4.32).

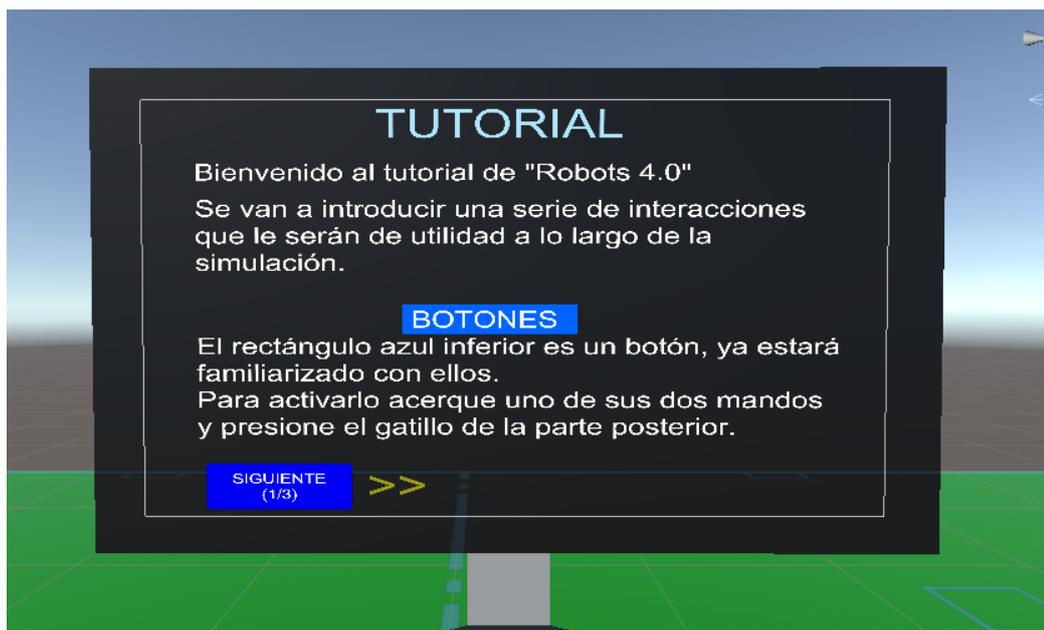


Figura 3.4.32. Tutorial: Botones

En este trabajo se ha mostrado una aplicación de gran utilidad para la realidad virtual en entornos industriales, la simulación de procesos.

Para ello, se ha modelado virtualmente la instalación robótica y el entorno donde se pretende ubicar y se ha programado la simulación, con ayuda de las cinemáticas de los robots, aprovechando las ventajas que brinda la realidad virtual.

Además, el flujo de trabajo seguido ha permitido sentar las bases de la futura instalación real: concretar los elementos que formarán parte de ella, localizar una ubicación óptima para su instalación, y definir los procesos a realizar.

La simulación servirá como base para desarrollar un gemelo digital una vez se disponga de la instalación real, con la idea de combinar la robótica y la realidad virtual en una sola aplicación donde los robots y los humanos interaccionan, tanto a través del mundo real como del virtual.

Con respecto a este punto se ha encontrado una librería que permite comunicar ROS con aplicaciones basadas en .NET como Unity3D [23].

La librería aún está en desarrollo, pero abre una interesante línea de investigación que puede simplificar la comunicación entre la instalación real y la virtual.

REFERENCIAS

- [1] "Industry 4.0." *Digital Transformation Monitor*, 7 Nov. 2019, ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/tags/industry-40
- [2] "Karel Capek." *Karel Capek and the Robot (Complete History)*, history-computer.com/Dreamers/Capek.html
- [3] "Laws of Robotics." *Wikipedia*, Wikimedia Foundation, 23 June 2018, en.wikipedia.org/wiki/Laws_of_robotics
- [4] "Unimate - The First Industrial Robot." *Robotics Online*, www.robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm
- [5] "Standards Catalogue." *ISO/TC 299 - Robotics*, 16 Apr. 2018, www.iso.org/committee/5915511/x/catalogue/
- [6] Pittman, Kagan. "A History of Collaborative Robots: From Intelligent Lift Assists to Cobots." www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/13540/A-History-of-Collaborative-Robots-From-Intelligent-Lift-Assists-to-Cobots.aspx
- [7] Technavio, and Technavio. "Top 21 Industrial Robotics Companies in 2018: Global Industrial Robotics Market." *Technavio*, Technavio, 22 May 2019, blog.technavio.com/blog/top-21-companies-in-the-industrial-robotics-market
- [8] "Programmable Constraint Machines." *CobotsGuide*. cobotsguide.com/
- [9] "Stereopsis." *Wikipedia*, Wikimedia Foundation, 16 Mar. 2019, en.wikipedia.org/wiki/Stereopsis
- [10] Barnard, Dom. "History of VR - Timeline of Events and Tech Development." *VirtualSpeech*, VirtualSpeech, 13 Aug. 2018, virtualspeech.com/blog/history-of-vr
- [11] "SCENE." *FARO SPAIN, S.L.U.*, www.faro.com/es-es/productos/3d-design/faro-scene/
- [12] *CloudCompare - Open Source Project*, www.danielgm.net/cc/
- [13] Foundation, Blender. "Home of the Blender Project - Free and Open 3D Creation Software." *Blender.org*, www.blender.org/

- [14] "Rendering (Computer Graphics)." *Wikipedia*, Wikimedia Foundation, 10 July 2019,
[en.wikipedia.org/wiki/Rendering_\(computer_graphics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Rendering_(computer_graphics))
- [15] Gferrer, A. "Geometry and Kinematics of the Mecanum Wheel." *Computer Aided Geometric Design*, vol. 25, no. 9, 2008, pp. 784–791.
- [16] "A* Search Algorithm." *Wikipedia*, Wikimedia Foundation, 10 July 2019,
en.wikipedia.org/wiki/A*_search_algorithm
- [17] A.Chennakesava Reddy. "Difference between Denavit-Hartenberg (D-H) classical and modified conventions for forward kinematics of robots with case study".
http://jntuhceh.org/web/tutorials/faculty/873_ic29-2014.pdf
- [18] Ryan Keating. "UR5 Inverse Kinematics".
- [19] "GNU Octave." *The GNU Operating System and the Free Software Movement*,
www.gnu.org/software/octave/
- [20] Technologies, Unity. "Unity." *Unity*,
unity.com/es
- [21] L. Pérez et al. "Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces"
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361518308546>
- [22] "4 Reasons Why You Should User Test Your Product Early And Often." *UserTesting Blog*, 7 Nov. 2018,
www.usertesting.com/blog/4-reasons-why-you-should-user-test-your-product/
- [23] Siemens. "Siemens/Ros-Sharp." *GitHub*, 3 July 2019,
github.com/siemens/ros-sharp
- F. C. Park and K. M. Lynch. "Introduction to robotics mechanics, planning, and control".

Figuras de terceros:

Figura 2.1.1. Primer robot industrial.

https://robotics.kawasaki.com/en1/anniversary/history/history_01.html

Figura 2.1.2. Inicios de la robótica colaborativa.

<https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/13540/A-History-of-Collaborative-Robots-From-Intelligent-Lift-Assists-to-Cobots.aspx>

Figura 2.1.3. Melfa Melcor.

<https://cobot.unibs.it/dev/melfa-melcor/>

Figura 2.1.4. Yumi.

<https://cobotsguide.com/2016/06/abb-yumi/>

Figura 2.1.5. Serie TM.

<https://www.omron.com/media/press/2018/05/c0514.html>

Figura 2.1.6. Serie CR.

<https://www.fanuc.eu/es/es/robots/página-filtro-robots/pobots-colaborativos>

Figura 2.1.7. HC-10.

<https://www.motoman.com/collaborative/products>

Figura 2.1.8. LBR iiwa.

<https://www.robots.com/robots/lbr-iiwa-7-r800>

Figura 2.1.9. duAro.

<https://robotics.kawasaki.com>

Figura 2.1.10. Serie TX.

<https://cobot.unibs.it/dev/tx2/>

Figura 2.1.11. COBOTTA.

<https://cobot.unibs.it/dev/tx2/>

Figura 2.1.12. CZ10.

<http://www.nachi-fujikoshi.co.jp/>

Figura 2.1.13. Aura.

<https://www.comau.com/EN/our-competences/robotics/automation-products/CollaborativeRobotsAura>

Figura 2.1.14. Serie UR.

www.jorgensen.pl/index.php?page=universal-robot-models

Figura 2.1.15. Cobots SIASUN.

<http://www.siasun-in.com/en/>

Figura 2.1.16. Sawyer y Baxter.

<http://adaptiverobotics.net/project/the-intera-3-platform/>

Figura 2.1.17. Serie Co-act.

<https://maseas.com/co-act-jl1-gripper.html>

Figura 2.2.1. HTC Vive.

<https://www.vive.com/us/product/vive-virtual-reality-system/>

Figura 2.2.2. Oculus Rift.

<https://www.roadtovr.com/oculus-rift-anniversary-sale-brings-deep-discounts-launch-titles/>

Figura 3.2.2. R 820 (LBR iiwa 14).

<https://www.robots.com/robots/lbr-iiwa-7-r800>

Figura 3.2.3. IRB 14000 (Yumi).

<https://cobotsguide.com/2016/06/abb-yumi/>

Figura 3.2.4. Summit XL Steel.

<https://www.robotnik.es/robots-moviles/summit-xl-steel/>

Figura 3.2.5. UR5 CB3.

<https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot/>

Figura 3.2.6. M-1iA.

<https://www.fanuc.eu/ua/en/robots/robot-filter-page/m1-series/m-1ia-05sl>

Figura 3.2.7. SICK MicroScan3.

<https://www.sick.com/us/en/opto-electronic-protective-devices/safety-laser-scanners/microscan3-core/c/g295658>

Figura 3.2.8. SICK M4000.

<https://www.sick.com/es/es/dispositivos-de-proteccion-optoelectronicos/barreras-fotoelectricas-de-seguridad-multihaz/m4000-standard-ap/c/g311876>

Figura 3.2.9. Gocator 2350.

<https://www.infaimon.com/producto/gocator-2350/>

Figura 3.2.10. BM 8350.

<https://robotiq.com/products/hand-e-adaptive-robot-gripper>

Figura 3.2.11. Seta de emergencia.

<https://www.se.com/es/es/product/XALK178F/caja-1-puls,emergencia-c,fracdes-2nc/>

Figura 3.3.4. Wrist Camera.

https://blog.robotiq.com/hubfs/Product-sheets/Product_sheet-Wrist-Camera-EN.pdf?_ga=2.1495153.1770090745.1563141051-1409105796.1563124237

Figura 3.3.5. Hand-E.

<https://robotiq.com/products/hand-e-adaptive-robot-gripper>

Figura 5.1. Tecnologías emergentes.

<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/>

