

Plataforma en realidad virtual para la manipulación cartesiana del gemelo digital de un robot UR3

Virtual Reality platform for Cartesian manipulation of digital twin in a UR3 robot

Ivan D. Ortiz ¹   Oscar A. Vivas ¹ 

¹Universidad del Cauca, Popayán Colombia

How to cite?

Ortiz, I.D., Vivas, O.A. Plataforma en realidad virtual para la manipulación cartesiana del gemelo digital de un robot UR3. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(1)e-20314418

<https://doi.org/10.25100/iyv.v27i1.14418>

Recibido: 19-09-24

Evaluado: 28-10-24

Aceptado: 21-11-24

Online: 30-01-25

Correspondence

 avivas@unicauca.edu.co

Resumen

Introducción: El desarrollo de plataformas de programación y control de trayectorias para robots colaborativos ha avanzado significativamente con la incorporación de tecnologías emergentes, como la realidad virtual.

Objetivo: El objetivo principal de este estudio es desarrollar e implementar una plataforma en realidad virtual que permita la programación y el control de trayectorias de un robot UR3. Además, se busca mejorar la accesibilidad y usabilidad del sistema, haciendo posible la definición de trayectorias cartesianas a través de la interacción visual y la integración de un gemelo digital del brazo robótico.

Metodología: el sistema fue desarrollado utilizando el motor de Unity 3D, permitiendo la creación de una interfaz visual interactiva para los usuarios. Se integró un gemelo digital del robot UR3, que se sincroniza con el casco de realidad virtual Meta Quest 2 para ofrecer una experiencia inmersiva. Los usuarios pueden definir trayectorias lineales mediante la colocación de puntos de control, pudiendo agregar o borrar puntos de forma intuitiva en el entorno virtual.

Resultados: la implementación de la plataforma permitió a los usuarios definir y controlar trayectorias de forma eficaz en un entorno de realidad virtual. Se observó que los usuarios pudieron interactuar con el sistema de manera intuitiva, creando trayectorias sin la necesidad de conocimientos previos en programación robótica. Además, el uso del gemelo digital proporcionó una representación visual precisa del comportamiento del robot en tiempo real.

Conclusiones: el estudio demuestra que la integración de la realidad virtual con el control de trayectorias de un robot colaborativo mejora la accesibilidad y la interacción de los usuarios con el sistema. Este enfoque no solo facilita el aprendizaje y la programación de trayectorias, sino que también sienta las bases para futuras mejoras en la interfaz gráfica y en las funcionalidades de control, permitiendo una personalización del sistema según las necesidades específicas de los usuarios.

Palabras clave: Realidad Virtual, Programación de Trayectorias, Robótica Industrial y Gemelo Digital.

Abstract

Introduction: the development of trajectory programming and control platforms for collaborative robots has significantly advanced with the integration of emerging technologies such as virtual reality.

Objective: the primary objective of this study is to develop and implement a virtual reality platform that enables the programming and control of trajectories for a UR3 robot. Additionally, the study aims to improve system accessibility and usability by allowing users to define Cartesian trajectories through visual interaction and by integrating a digital twin of the robotic arm.

Methodology: the system was developed using Unity 3D, enabling the creation of an interactive visual interface for users. A digital twin of the UR3 robot was integrated, which synchronizes with the Meta Quest 2 VR headset to provide an immersive experience. Users can define linear trajectories by placing control points, with the ability to easily add or delete points within the virtual environment.

Results: the implementation of the platform allowed users to effectively define and control trajectories within a virtual reality environment. It was observed that users were able to interact with the system intuitively, creating trajectories without prior robotic programming knowledge. Moreover, the use of the digital twin provided an accurate real-time visual representation of the robot's behavior.

Conclusions: this study demonstrates that the integration of virtual reality with collaborative robot trajectory control enhances user accessibility and interaction with the system. This approach not only facilitates learning and trajectory programming but also lays the foundation for future improvements in the graphical interface and control functionalities, enabling system customization according to specific user needs.

Keywords: Virtual Reality, System Trajectory Programming, Industrial Robotics and Digital Twin.



Contribución a la literatura

¿Por qué se realizó?

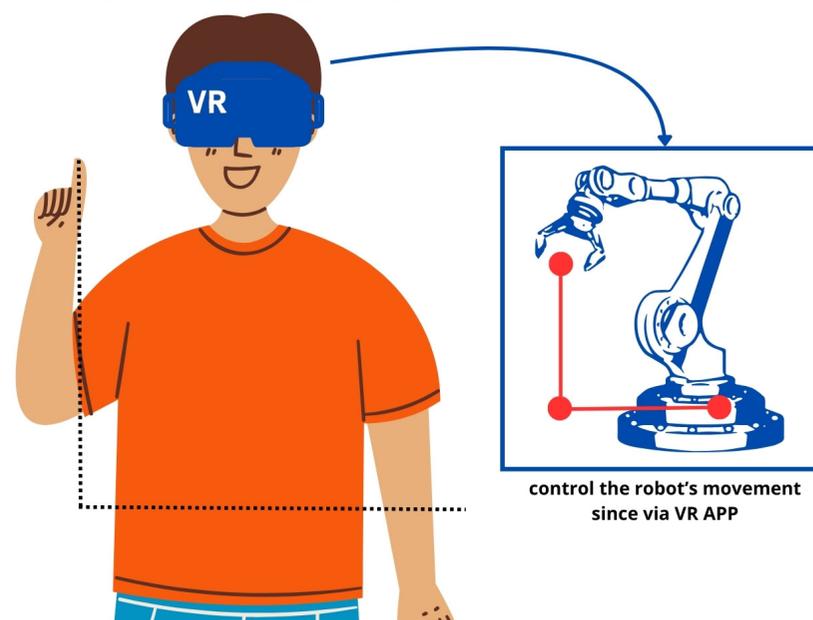
El estudio se centró en el desarrollo e implementación de una plataforma de realidad virtual (RV) para la programación y el control de trayectorias del robot colaborativo UR3, que cuenta con seis grados de libertad. Este trabajo se alinea con los principios de la Industria 4.0, haciendo hincapié en la integración de sistemas ciberfísicos y tecnologías emergentes como la RV para mejorar la interacción humano-robot. La investigación busca mejorar la accesibilidad para nuevos usuarios al proporcionar un sistema intuitivo que permite la definición visual y la modificación de trayectorias cartesianas, sentando las bases para futuros avances y personalizaciones.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

El resultado más significativo fue la implementación de un sistema que permite el control del robot tanto en modo articular como cartesiano. Esto se logró mediante un modelo digital desarrollado en SolidWorks y transferido a Unity 3D mediante Blender. La integración con dispositivos de realidad virtual, como Meta Quest 2, proporcionó una interfaz intuitiva para crear y modificar trayectorias, permitiendo a los usuarios evaluar los movimientos desde múltiples perspectivas. La aplicación admite los modos articulares y cartesianos en el entorno de realidad virtual (RV), lo que permite un ajuste preciso de cada articulación del robot mediante el algoritmo de Control de Par Calculado (CTC) con la precisión adecuada.

¿Qué aportan estos resultados?

Estos resultados contribuyen a mejorar la accesibilidad y la usabilidad de los sistemas de programación de trayectorias, especialmente para usuarios con poca experiencia en robótica industrial. La plataforma ofrece un entorno seguro y controlado para programar y validar movimientos antes de la implementación física, minimizando así los riesgos y optimizando los procesos. Además, establece una base flexible y personalizable para futuros avances en la programación y los sistemas de control robóticos, con posibles aplicaciones tanto en entornos industriales como educativos. La integración con dispositivos de realidad virtual, como Meta Quest 2, facilita aún más la creación y modificación intuitiva de trayectorias, lo que permite la evaluación de movimientos desde diversas perspectivas.



Introducción

La Industria 4.0 es una de las tendencias tecnológicas más destacadas a nivel mundial, caracterizada por la integración de sistemas ciberfísicos en los procesos logísticos y de fabricación. Esta tendencia surge debido al desarrollo, uso y adopción de tecnologías emergentes, como el uso de la robótica y los sistemas de realidad virtual en la industria (1) (2). Su objetivo principal es utilizar tecnologías avanzadas para ayudar a los humanos a tomar decisiones y realizar tareas que pueden ser agotadoras, tediosas o repetitivas (3) (4). Una forma de integrar los robots en la industria es a través de robots colaborativos, también conocidos como Cobots (5).

Los cobots se pueden programar fácilmente utilizando sistemas de programación de trayectorias, que desempeñan un papel fundamental en la automatización al permitir la programación y el control del movimiento del robot en las líneas de producción mediante herramientas visuales (6). Estos sistemas visuales permiten a los operadores definir trayectorias precisas especificando puntos en el espacio virtual que el robot puede emular posteriormente en el espacio físico, todo ello sin tener que escribir un solo código de línea, lo que permite una mejor interacción entre el operador y el robot/máquina (7).

Como resultado, estos sistemas se consideran fáciles de usar porque no dependen del código para funcionar y no requieren programadores expertos para operar (8). Además, el sistema debe contar con un buen sistema de inmersión para fijar las trayectorias del robot, permitiendo un dimensionamiento más preciso del espacio de trabajo dentro de un entorno virtual (9). En este contexto, la Realidad Virtual (RV) surge como la solución ideal para la programación y el control de robots (10), ya que permite una interacción más natural y precisa con el entorno virtual (11), facilitando la programación de trayectorias y la visualización de movimientos en un espacio tridimensional inmersivo (12) (13).

Por lo anterior, es conveniente integrar el uso de sistemas de ejecución de trayectorias para Cobots con sistemas de realidad virtual, ya que estos son inmersivos y ofrecen modelos fáciles de entender (13). A diferencia de los diseños tradicionales basados en sistemas 2D (tableta o pantalla de ordenador), los sistemas tridimensionales (gafas VR) permiten un mejor análisis de los movimientos y el diseño del robot, proporcionando una perspectiva más amplia y detallada a través de la navegación en el mundo virtual. Esto permite analizar completamente el modelo diseñado y su espacio de trabajo, y programar puntos cartesianos para ejecutar trayectorias que los conecten en tres dimensiones (14). De esta forma, se ofrece una nueva perspectiva desde el punto de vista del operario, ya que este nuevo enfoque permite detectar y corregir errores antes de pasar a la fase de producción (11).

Obra relacionada

En la última década, ha habido un continuo y creciente interés en la investigación sobre sistemas de programación de trayectorias. Varios investigadores han presentado diferentes enfoques y métodos para implementar tecnologías de realidad virtual/aumentada dentro de estos sistemas. Por ejemplo, en (15), la realidad aumentada (RA) se utiliza para proyectar un robot sobre una superficie

determinada a través de un teléfono inteligente, y realiza un movimiento mediante marcadores que indican los puntos de inicio y finalización. De la misma manera, en (16), esta tecnología se utiliza con una tableta para validar diferentes interacciones humano-robot en un entorno de automoción, poniendo de manifiesto la incomodidad del operario que tiene que sujetar la tableta mientras utiliza una herramienta. Este tema, aunque no se menciona en el documento, es crucial ya que el usuario debe sostener el teléfono en todo momento, lo que convierte a esta tecnología en una de las menos viables para su implementación.

Por otro lado, entre las tecnologías que utilizan la realidad mixta (RM), (17) ofrece ciertas ventajas sobre la realidad virtual (VR), lo que permite mapear con precisión el espacio real dentro del espacio virtual. Los usuarios pueden percibir e interactuar directamente con la información de entrada del sistema, el sonido espacial y la ubicación mediante la combinación de objetos virtuales dentro del mundo real con los que pueden interactuar (10). Sin embargo, esto también podría considerarse una ventaja de la realidad virtual, ya que esta tecnología opera en un entorno controlado, evitando que factores externos como la luz solar o la distancia entre las gafas y el objeto afecten a la programación de la trayectoria. Además, siempre es posible replicar objetos reales en el espacio virtual con las mismas dimensiones, como se muestra en (11). Sin embargo, de acuerdo con el (18), cuando se utiliza un sistema de realidad mixta, el gemelo digital visto a través de las gafas debe colocarse sobre el mismo robot visible en la realidad, lo que puede provocar un solapamiento incómodo para el operador.

En consecuencia, los sistemas de realidad virtual ofrecen características únicas. Como se menciona en (19) y (20), una ventaja de los sistemas VR es su uso en tareas de teleoperación, permitiendo controlar robots sin presencia física, lo que facilita la seguridad industrial como se menciona en (21). El operador puede controlar el robot sin riesgo y sin detener la producción en la línea de montaje (22). Además, el apoyo constante de las principales empresas tecnológicas y la disminución del costo de las gafas de realidad virtual han fomentado el uso de aplicaciones de realidad virtual. En los últimos años, las investigaciones han mostrado una tendencia hacia este tipo de tecnología, tal y como se refleja en los artículos (23), (24), (25) y (26), donde se utilizan gafas de realidad virtual junto a gemelos digitales que replican los movimientos de un robot manipulador. En (23), se utiliza un robot KUKA KR10; en (24), un robot FANUC M-10iA; y en (25) y (26), un robot Mitsubishi Movemaster RV-M1 para crear sus equivalentes digitales en el espacio virtual, desarrollando aplicaciones en un entorno inmersivo que represente adecuadamente sus movimientos, los cuales serán replicados en el espacio real.

Así, la exploración de las tecnologías VR, AR o MR ha permitido identificar diversas oportunidades y retos en la programación de trayectorias, con aplicaciones en varios campos industriales. La realidad aumentada, aunque prometedora, tiene limitaciones prácticas que dificultan su viabilidad, especialmente en la necesidad de dispositivos portátiles y la falta de comodidad que ofrecen cuando se utilizan con otras herramientas. Por otro lado, la realidad mixta ofrece una integración más precisa de los entornos reales y virtuales, pero aún enfrenta desafíos técnicos como la superposición visual y el control limitado sobre diferentes entornos. De esta forma, la realidad virtual, con sus entornos controlados y el creciente apoyo de las grandes corporaciones, se erige como una alternativa sólida, especialmente en el ámbito de la teleoperación y la seguridad

industrial. La creciente tendencia en la investigación y aplicación de sistemas de realidad virtual, como lo demuestran estudios recientes, sugiere un potencial significativo para el desarrollo de soluciones innovadoras y eficientes en la automatización y el control de robots. En este contexto, el uso de gemelos digitales en entornos inmersivos se posiciona como una herramienta clave para optimizar la interacción humano-robot y mejorar la eficiencia de los procesos productivos.

Metodología

Para la configuración experimental utilizada en este proyecto, las actividades se han dividido en dos componentes principales. El primer componente implica el uso de herramientas para construir el modelo digital del robot. El segundo componente se centra en las herramientas para construir el sistema de programación de trayectorias, que es el enfoque principal de este documento.

Creación de modelos digitales

Para crear el modelo digital, es imprescindible utilizar una herramienta que pueda crear modelos tridimensionales. Se seleccionó SolidWorks como la herramienta elegida por varias razones. En primer lugar, su facilidad de uso se destaca por sus interfaces intuitivas. En segundo lugar, sus amplias capacidades de modelado de objetos en 3D permiten un diseño detallado del ensamblaje. Por último, su robustez a la hora de exportar productos en varios formatos de archivo lo convierte en la opción ideal.



Figura 1 Cobot compacto UR3 de Universal Robots **Fuente:** Robots universales

Así, esta herramienta se utiliza para diseñar el brazo robótico que se integrará en el motor gráfico, inspirado en el diseño de un robot UR3 (Figura 1) de Universal Robots con seis grados de libertad. El resultado se muestra en Figura 2. En este ensamblaje, cada sección se divide en carpetas con el nombre del eje correspondiente (Base, Axis1, Axis2, Axis3, Axis4, Axis5 y Axis6) para identificar mejor

las partes que pertenecen a cada eje de rotación del robot. Esto permite que se exporten de forma independiente, lo que se necesita posteriormente en el motor gráfico para generar las rotaciones de cada eje, construyendo así un modelo más funcional.

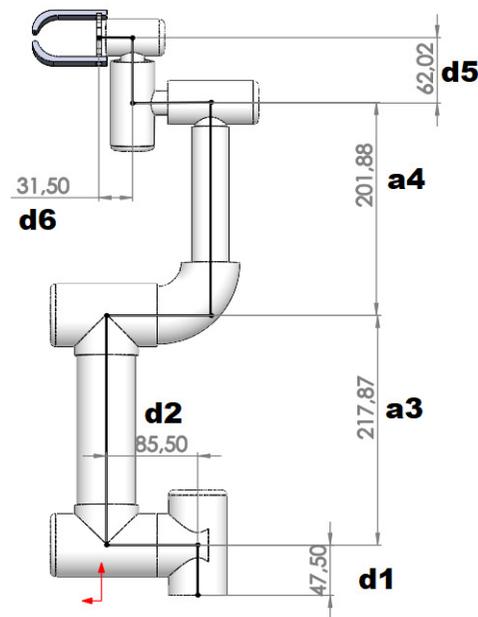


Figura 2 Diseño de brazo robótico Six Degrees of Freedom

Dado que SolidWorks no tiene una herramienta de exportación directa para Unity, Blender se utiliza como herramienta intermediaria para leer los archivos en el motor gráfico. Los objetos creados en la herramienta CAD primero se exportan en PLY (Polygon File Format) y luego se abren en Blender, que puede leer este tipo de archivo. Dentro de este programa, el primer paso es definir el origen de la pieza, que también se considerará su eje de rotación, esencial para generar el movimiento de rotación. Finalmente, considerando las escalas que se utilizarán en Unity, el valor en las casillas X, Y y Z se establece en 0.001, con estas nuevas dimensiones el objeto es lo suficientemente pequeño como para ser manipulado y visualizado en el proyecto de realidad virtual. Las configuraciones realizadas para la pieza se pueden ver en Figura 3, que replica la misma configuración para los otros seis objetos creados y exportados en formato FBX (FilmBox) para abrirlos y trabajar con ellos dentro del motor gráfico.

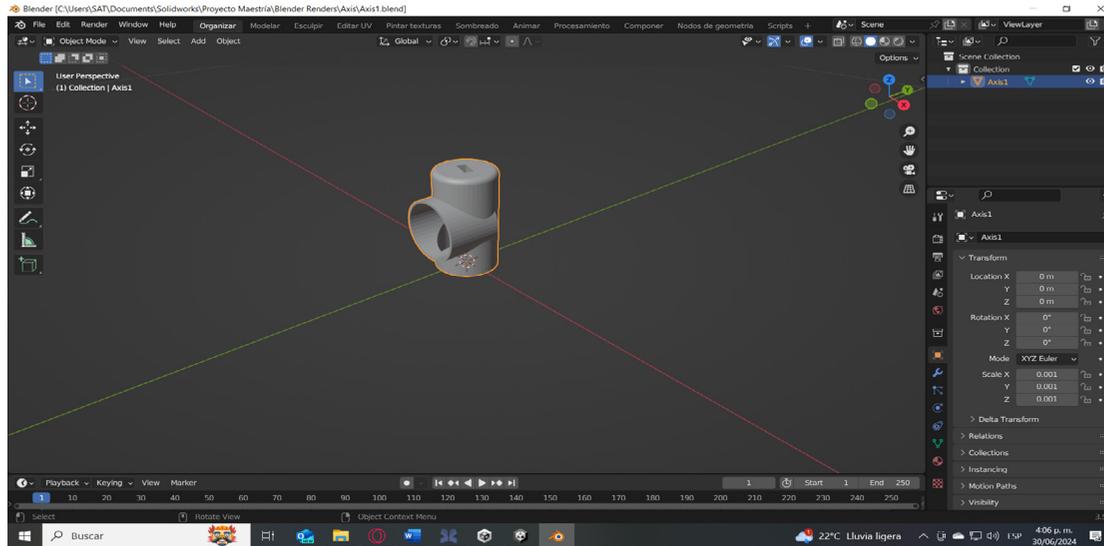


Figura 3 Modificaciones aplicadas para la exportación de objetos de juego

Programa de trayectoria del sistema

Para desarrollar la aplicación, el diagrama de flujo que se muestra en Figura 4 correspondiente, a la aplicación VR diseñada para la programación y control de robots industriales. Este diagrama ilustra el proceso desde el inicio de la aplicación hasta la ejecución de acciones en el robot, destacando las funcionalidades disponibles en los modos de operación articular y cartesiano.

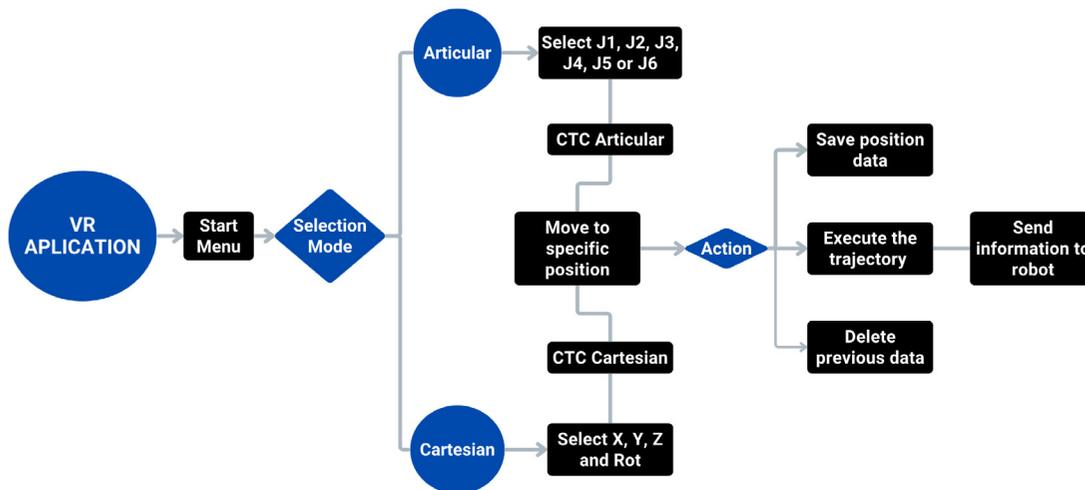


Figura 4. Diagrama de flujo de la aplicación de realidad virtual

Al iniciar la aplicación, el usuario es guiado a través de un menú de inicio desde el que se selecciona el modo de operación deseado. La aplicación VR proporciona dos modos de control principales:

Modo articular: este modo permite al usuario seleccionar una de las seis articulaciones del robot (J1, J2, J3, J4, J5 o J6) para su ajuste. Una vez seleccionada la unión, se utiliza el algoritmo de control de par calculado (junta CTC) para calcular y ajustar los ángulos de Euler necesarios para lograr la orientación deseada. A continuación, el robot se desplaza a la posición específica determinada por estos cálculos.

Modo cartesiano: alternativamente, el modo cartesiano permite al usuario introducir las coordenadas X, Y y Z y la rotación deseada del efector final. Para convertir estas coordenadas en instrucciones que el robot puede ejecutar, se utiliza el algoritmo de control de par calculado (CTC cartesiano) para resolver la cinemática inversa y calcular los ángulos de unión necesarios. A continuación, el robot se desplaza a la posición cartesiana especificada. Una vez que el robot se ha posicionado correctamente, el sistema ofrece tres acciones posibles:

- Guarde los datos de posición, lo que permite almacenarlos para futuras ejecuciones.
- Elimine los datos anteriores si se requieren ajustes para la programación del robot.
- Envíe los datos calculados directamente al robot, incluida la transferencia de información al dispositivo físico, si está presente, y la ejecución de la trayectoria programada dentro de la aplicación de realidad virtual.

Este flujo de trabajo refleja la capacidad de la aplicación para proporcionar un control preciso y flexible de los robots industriales, integrando métodos avanzados de control de trayectoria tanto en el espacio articular como en el cartesiano. Para lograr este nivel de precisión y flexibilidad, se utiliza Unity 3D para crear el entorno virtual. Unity 3D es un motor gráfico conocido por su facilidad de uso a través de su editor y herramientas intuitivas. Además, ofrece sólidas capacidades de desarrollo de aplicaciones de realidad virtual (VR) a través de la biblioteca Open XR, que es esencial para el desarrollo de este sistema. Su compatibilidad con la mayoría de los dispositivos de realidad virtual y el apoyo de una gran comunidad de desarrolladores, que proporcionan una amplia información y documentación, hacen de Unity una herramienta ideal para resolver problemas específicos y optimizar proyectos complejos en este campo.

Para integrar el sistema con el diseño 3D creado en Figura 2, primero se crea un entorno tridimensional utilizando las capacidades del editor de Unity para construir el mundo virtual utilizando la herramienta ProBuilder, desarrollando un entorno inmersivo que incluye un espacio de trabajo basado en un laboratorio, como se muestra en Figura 5. Este laboratorio contiene una mesa sobre la que se colocará el brazo robótico, y mediante la herramienta Open XR, se integrarán un par de controladores para el uso de herramientas y sistemas Unity que interactúan con ellos para aplicar cambios y movimientos al robot.

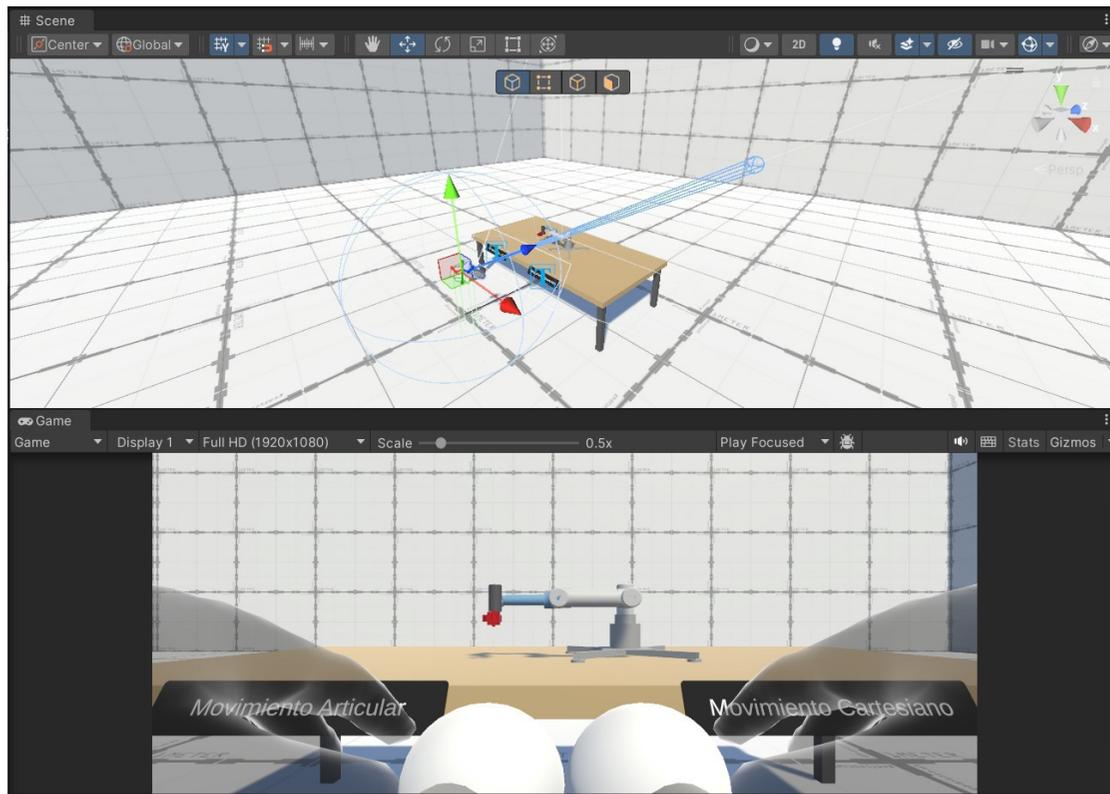


Figura 5 Creación del entorno virtual

Para controlar el sistema, se utiliza el casco de realidad virtual Meta Quest 2, un dispositivo conocido por proporcionar una experiencia de realidad virtual de alta calidad que es altamente portátil y fácil de usar. Incluye dos controladores y un auricular con un procesador Qualcomm Snap Dragon XR2, 6 GB de RAM, 128 GB de almacenamiento, una resolución de 1832 x 1920 por ojo, una frecuencia de actualización de 60, 72 y 90 Hz, y admite conexiones Wi-Fi y Bluetooth (27).



Figura 6 Casco de realidad virtual y controles: Meta Quest 2

El sistema que se muestra en Figura 6 tiene como objetivo permitir al usuario definir las trayectorias cartesianas del robot utilizando los controladores proporcionados por el sistema Meta Quest 2.

Resultados y discusión

Para garantizar que el sistema sea capaz de ejecutar las trayectorias solicitadas, el robot se programó para realizar una serie de movimientos predeterminados para monitorear el rendimiento del robot y verificar que el sistema de trayectorias creado ejecuta las trayectorias solicitadas, tanto en coordenadas articulares como cartesianas.

Movimiento articular

Para las trayectorias de ejecución en el espacio articular, se implementó un CTC (Computed Torque Control), como se muestra en Figura 7. Este control, desarrollado en Simulink, regula cada una de las seis articulaciones del robot durante la ejecución de la trayectoria en el entorno tridimensional de realidad virtual. La función de movimiento articular se utiliza para ajustar cada articulación de acuerdo con los requisitos específicos de una trayectoria programada.

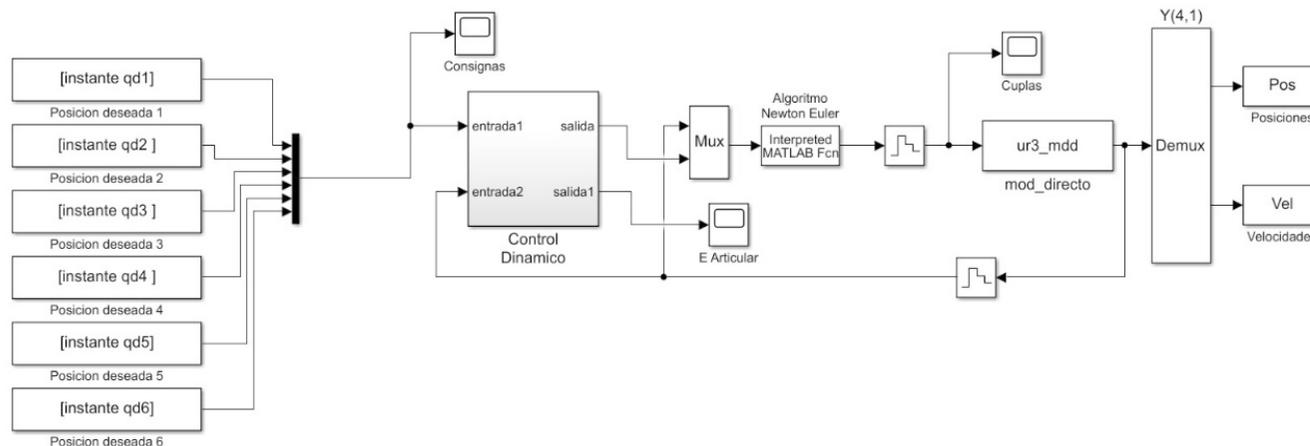


Figura 7 Control de CTC articular

La precisión del sistema de control y la exactitud de los ángulos deseados se evaluaron comparando los datos obtenidos durante el experimento con los ángulos originales previstos para cada unión para confirmar el nivel de precisión presente para cada unión. Esta comparación se ilustra en Figura 8 y nos permite determinar el error en el espacio articular, que, según el gráfico, muestra un mayor grado de error en la cuarta articulación, con un error de 15×10^{-4} radianes (menos de dos miliradianes).

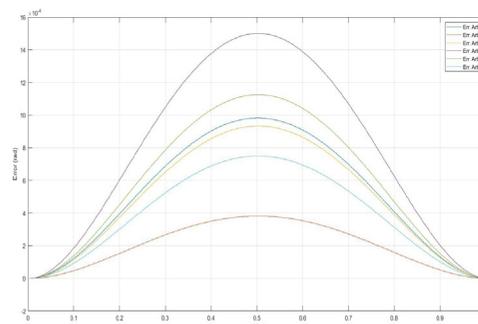


Figura 8 Articular Error

Los datos obtenidos se integraron en el sistema de movimiento articular, permitiendo una programación precisa de cada punto de la trayectoria. La Figura 9 muestra cómo se manipula el control deslizante para ajustar el ángulo de rotación de la primera muñeca del robot antes de guardar el punto de trayectoria. Este proceso garantiza que el gemelo digital siga con precisión el ángulo deseado, lo que permite obtener una vista previa del movimiento en el espacio tridimensional virtual. Esto se logra mediante el uso de los auriculares y controladores de realidad virtual, lo que facilita una evaluación integral del movimiento desde todas las perspectivas posibles.



Figura 9 Generación de puntos a partir de coordenadas articulares

Movimiento cartesiano

En este caso, la implementación de las trayectorias se gestiona mediante el control CTC cartesiano, que ofrece importantes ventajas en términos de precisión y adaptabilidad a diferentes condiciones de carga, al regular los movimientos de cada articulación del robot. El control implementado a través de Simulink se muestra en la Figura 10, que permite la inclusión precisa de valores previamente obtenidos del modelo CAD del brazo robótico, diseñado en SolidWorks.

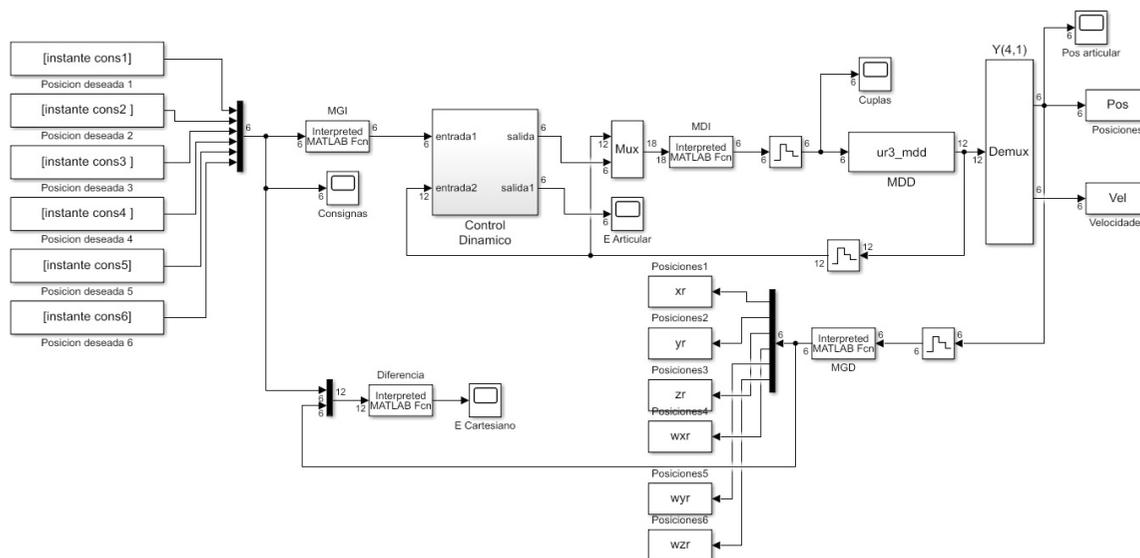


Figura 10 Control CTC cartesiano

Una vez introducidos los datos del robot en Simulink, se muestra el panel para controlar el robot mediante coordenadas cartesianas, tal y como se muestra en la Figura 11. Usando los controladores en el mundo virtual, es posible manipular las coordenadas del efector final, que determina el punto al que debe moverse el robot. Esto permite que los puntos deseados se agreguen a lo largo de toda la trayectoria para comenzar la prueba.

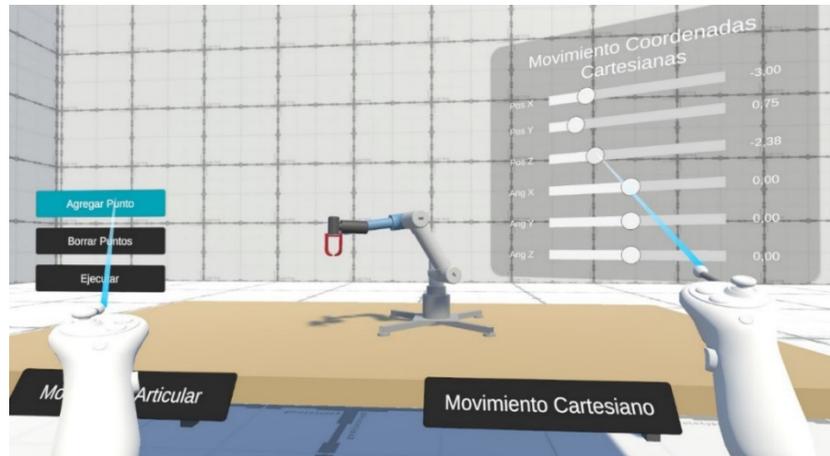


Figura 11 Generación de puntos a partir de coordenadas cartesianas

Estos datos se programan en el entorno tridimensional que se muestra en la Figura 11, y al pulsar el botón Ejecutar, el gemelo digital seguirá las trayectorias en el entorno tridimensional utilizando las coordenadas y orientaciones X, Y, Z previamente programadas, asegurándose en todo momento de que el robot está siguiendo la trayectoria planificada. Una vez ejecutado el movimiento programado, se comparan los datos capturados en el lugar donde se colocó la última unión con las posiciones deseadas y, calculando esta diferencia, se obtiene el error resultante para cada dimensión.

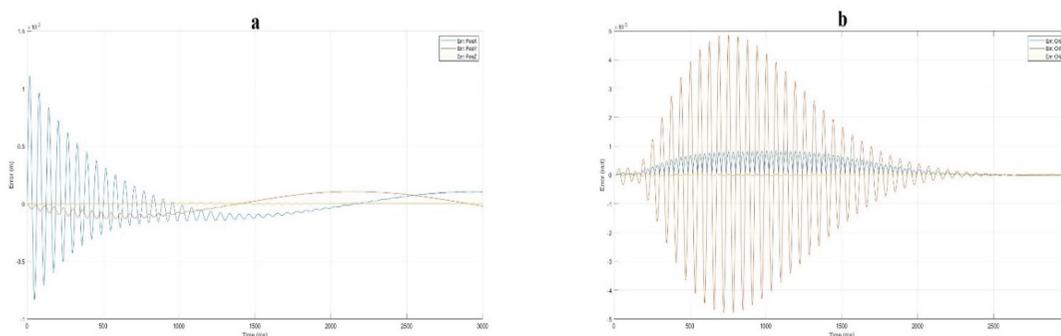


Figura 12 Error cartesiano, posición (a) y orientación (b)

Para evaluar la precisión del sistema de control y la exactitud de las trayectorias ejecutadas, los datos obtenidos durante el experimento se compararon con las posiciones deseadas originales. Esta comparación, que se muestra en la Figura 12, muestra el error de posición para cada una de las señales a la izquierda y el error de orientación a la derecha. A partir de Figura 12 (a), se observa

que el error de posición cartesiano máximo es del orden de 1×10^{-3} metros (un milímetro) y el error cartesiano de orientación, visto en Figura 12 (b), es del orden de 5×10^{-5} radianes (menos de 50 microradianes). Este nivel de precisión indica que el control CTC implementado es relativamente bajo para su uso en aplicaciones industriales.

Por lo tanto, podemos considerar que el uso de dispositivos VR en los sistemas de programación de trayectorias facilitaría la creación intuitiva de trayectorias cartesianas, permitiendo a los usuarios agregar y modificar fácilmente los puntos deseados. Este enfoque podría mejorar la accesibilidad y la usabilidad de los sistemas de programación de trayectorias para nuevos usuarios y proporcionar un marco sólido para futuras mejoras y personalizaciones.

Conclusiones

En este trabajo se presenta una aplicación desarrollada en Unity 3D para el manejo y control de las trayectorias de un gemelo digital. Se utilizó SolidWorks para el modelado, creando un modelo de seis grados de libertad basado en UR3 de Universal Robots. Posteriormente, las piezas se exportaron a Unity a través de Blender, lo que permitió una integración efectiva en el entorno virtual. Además, se utilizó un sistema de control tanto en modo articular como cartesiano utilizando el algoritmo CTC para lograr movimientos suficientemente precisos.

La aplicación desarrollada en Unity implementó el uso de un sistema de realidad virtual a través de los auriculares y controladores Meta Quest 2, lo que permitió la interacción con el gemelo digital a través de botones y deslizadores. En el modo articular, cada articulación se controló individualmente, mientras que en el modo cartesiano, se definieron puntos tanto en posición como en orientación para X, Y y Z en la unión final.

Además, el desarrollo de este sistema demostró un enfoque flexible para la programación de trayectorias, destacando la utilidad de la realidad virtual en la creación y modificación de trayectorias, ya que permite la evaluación de la posición del punto en el espacio desde todos los ángulos posibles, permitiendo la planificación previa de la ejecución de la trayectoria. Por lo tanto, el trabajo futuro propone construir y probar el sistema en un prototipo físico con un robot de seis grados de libertad para evaluar su rendimiento con movimientos cartesianos y comparar las trayectorias programadas por el usuario con las ejecutadas por el robot real.

Referencias

1. Ministerio de las tecnologías de la información y la telecomunicación - Aspectos básicos de la industria 4.0. [Online].; 2019 [cited 2023 03 23]. Available from: <https://colombiatic.mintic.gov.co/679/w3-article-124767.html>.
2. Rejikumar G, Raja V, Arunprasad P, Persis J, Sreeraj K. Industria 4.0: hallazgos clave y análisis desde el ámbito de la literatura. Benchmarking: Una revista internacional. 2019. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/bij-09-2018-0281/full/pdf>

3. Moran R, Teragni M, Zabala G. Bits físicos: un entorno de programación en vivo para la robótica educativa. En Lepuschitz W, Merdan M, Koppensteiner G, Balogh R, Obdržálek D, editores. *Robótica en la Educación*; 2021; Cham: Springer International Publishing. págs. 291-303. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67411-3_26
4. Mital A, Pennathur A. Tecnologías avanzadas y humanos en los lugares de trabajo de fabricación: una relación interdependiente. *Revista Internacional de Ergonomía Industrial*. 2004; 33: págs. 295-313. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2003.10.002>
5. ESIC. *Robótica Colaborativa: Qué es y Qué papel tienen las personas*. [Online]. [cited 2023 03 04]. Available from: <https://www.esic.edu/rethink/tecnologia/robotica-colaborativa-papel-tienen-las-personas>.
6. Kohrt C, Stamp R, Pipe A, Kiely J, Schiedermeier G. Un sistema de apoyo a la planificación y programación de trayectorias de robots en línea para uso industrial. *Robótica y Fabricación Integrada por Ordenador*. Año 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.07.010>
7. Brito T, Queiroz J, Piardi L, Fernandes L, Lima J, Leitão P. Un enfoque de aprendizaje automático para la inspección de fabricación inteligente de robots colaborativos para sistemas de control de calidad. *Procedia Fabricación*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.003>
8. Zhu Z, Hu H. Robot aprendiendo de la demostración en ensamblaje robótico: una encuesta. *Robótica*. 2018. <https://doi.org/10.3390/robotics7020017>
9. Cohavi O, Levy-Tzedek S. Los usuarios jóvenes y mayores prefieren la realidad virtual inmersiva a un robot social para el entrenamiento cognitivo a corto plazo. *Revista Internacional de Estudios Humano-Computadora*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2022.102775>
10. Litvinova Y, Rilke RM, Guenther C. Yo, yo mismo y yo: preocupaciones sobre la imagen y honestidad en la realidad virtual inmersiva. *Las computadoras en el comportamiento humano*. diciembre de 2023; 149: pág. 107950. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2023.107950>
11. Holubek R, Ružarovský R, Velíšek K, Janíček M. Nueva tendencia en el estudio de caso de programación de robots industriales y diseño de sistemas de producción utilizando la realidad virtual. *Serie de Conferencias IOP: Ciencia e Ingeniería de Materiales*. 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1009/1/012023>
12. Park BJ, Hunt SJ, Martin C, Nadolski GJ, Wood BJ, Gade TP. Realidad aumentada y mixta: tecnologías para mejorar el futuro de las relaciones internacionales. *Revista de Radiología Vasculare e Intervencionista*. 2020; 31: págs. 1074-1082. <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2019.09.020>
13. Bolaño G, Roennau A, Dillmann R, Groz A. Realidad virtual para la programación fuera de línea de aplicaciones robóticas con métodos de enseñanza en línea. En la 17ª Conferencia Internacional sobre Robots Ubicuos (UR); 2020. <https://doi.org/10.1109/UR49135.2020.9144806>
14. Costa G, Petry M, Moreira A. Realidad aumentada para la colaboración humano-robot y la cooperación en aplicaciones industriales: una revisión sistemática de la literatura. *Sensores*. 2022. <https://doi.org/10.3390/s22072725>
15. Fang H, Ong S, Nee A. Planificación de la trayectoria del robot y la orientación del efector final mediante realidad aumentada. *Procedia CIRP*. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.034>
16. Michalos G, Karagiannis P, Makris S, Tokçalar Ö, Chryssolouris G. Aplicaciones de realidad aumentada (AR) para apoyar la cooperación interactiva humano-robot. *Procedia CIRP*. Año 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.005>



17. Ostanin M, Klimchik A. Programación interactiva de robots mediante realidad mixta. IFAC-PapersOnLine. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.517>
18. Rosen E, Whitney D, Phillips E, Chien G, Tompkin J, Konidaris G, et al. Comunicación de la intención de movimiento del brazo del robot a través de pantallas montadas en la cabeza de realidad mixta. en investigación en robótica.: Springer International Publishing; 2019. págs. 301-316. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28619-4_26
19. Zhang T, Mccarthy Z, Jow O, Lee D, Chen X, Goldberg K, et al. Aprendizaje de imitación profunda para tareas de manipulación complejas a partir de la teleoperación de realidad virtual. En; 2018. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8461249>
20. Baklouti E, Jallouli M, Amouri L, Amor B. Control remoto de robot móvil a través de un entorno de realidad virtual 3D. En Congreso Internacional sobre Comportamientos Individuales y Colectivos en Robótica; Año 2013. <https://doi.org/10.1109/ICBR.2013.6729276>
21. Kot T, Novák P. Aplicación de la realidad virtual en la teleoperación del sistema robótico móvil militar TAROS. Revista Internacional de Sistemas Robóticos Avanzados. Enero de 2018; 15. <https://doi.org/10.1177/1729881417751545>
22. Ružarovský R, Holubek R, Delgado Sobrino DR, Velíšek K. Un estudio de caso de simulaciones robóticas utilizando la puesta en marcha virtual apoyada en el uso de la realidad virtual. Web de Conferencias MATEC. 2019. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929902006>
23. Murhij Y, Serebrenny V. Una aplicación para simular y controlar robots industriales en un entorno de realidad virtual integrado con el sensor de cámara estéreo IR. IFAC-PapersOnLine. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.473>
24. Garg G, Kuts V, Anbarjafari G. Gemelo digital para robots FANUC: programación y simulación de robots industriales mediante realidad virtual. Sostenibilidad. Año 2021. <https://doi.org/10.3390/su131810336>
25. Crespo R, García R, Quiroz S. Aplicación de Realidad Virtual para Simulación y Programación Off-line del Robot Mitsubishi Movemaster RV-M1 Integrado con el Oculus Rift para Mejorar la Formación de los Estudiantes. Procedia Ciencias de la Computación. Año 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.226>
26. Crespo R, García R, Quiroz S. Simulador de realidad virtual para el aprendizaje de la robótica. En la Conferencia Internacional sobre Aprendizaje Interactivo, Colaborativo y Combinado (ICBL); Año 2015. <https://doi.org/10.1109/ICBL.2015.7387635>
27. Meta. Empieza a usar Meta Quest 2. [En línea].; 2020. Disponible en: <https://www.meta.com/quest/products/quest-2/tech-specs/>.