



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
ESCUELA DE POSGRADOS “ESPOG”

MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021

PROYECTO DE TITULACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGISTER

Título del artículo
Sistema de realidad aumentada para el control del brazo robótico UFACTORY Lite 6
Línea de Investigación:
Ciencias de la ingeniería aplicadas a la producción, sociedad y desarrollo sustentable
Campo amplio de conocimiento:
Ingeniería, Industria y Construcción.
Autor/a:
Ing. Mg. José Ezequiel Naranjo Robalino
Tutor/a:
PhD. Maryory Urdaneta Herrera Mg. Wilmer Fabian Albarracín Guarochico

Quito – Ecuador

2024

APROBACIÓN DEL TUTOR



Yo, MARYORY URDANETA HERRERA con C.I: 1759316126, tutor del proyecto de investigación titulado: **Sistema de realidad aumentada para el control del brazo robótico UFACTORY Lite 6.**

Elaborado por: José Ezequiel Naranjo Robalino, de C.I: 1804710463, estudiante de la Maestría: Electrónica y Automatización, de la **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL (UISRAEL)**, como parte de los requisitos sustanciales con fines de obtener el Título de Magister, me permito declarar que luego de haber orientado, analizado y revisado el trabajo de titulación, lo apruebo en todas sus partes.

Quito D.M., 11 de marzo de 2024



Firma

DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE



Yo, José Ezequiel Naranjo Robalino con C.I: 1804710463, autor del proyecto de titulación denominado: Sistema de realidad aumentada para el control del brazo robótico UFACTORY Lite 6. Previo a la obtención del título de Magister en Electrónica y Automatización. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar el respectivo trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

1. Manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica Israel los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor del trabajo de titulación, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital como parte del acervo bibliográfico de la Universidad Tecnológica Israel.
2. Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de prosperidad intelectual vigentes.

Quito D.M., 11 de marzo de 2024



Firma

Tabla de contenidos

APROBACIÓN DEL TUTOR	2
DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE	3
INFORMACIÓN GENERAL	7
Contextualización del tema	7
Problema de investigación.....	8
Objetivo general	8
Objetivos específicos	8
Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos:	8
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL ARTÍCULO PROFESIONAL	9
1.1. Contextualización general del estado del arte.....	9
1.2. Proceso investigativo metodológico	11
CAPÍTULO II: ARTÍCULO PROFESIONAL	12
2.1. Resumen	12
2.2. Abstract	12
2.3. Introducción	13
2.4. Metodología	14
2.5. Resultados – Discusión.....	25
CONCLUSIONES.....	29
RECOMENDACIONES.....	30
BIBLIOGRAFÍA.....	31
ANEXOS.....	34

Índice de tablas

Tabla 1: Rango de trabajo de cada junta.	16
---	----

Índice de figuras

Figura 1: Continuo de la virtualidad.....	15
Figura 2: Diagrama jerárquico del sistema RA.....	17
Figura 3: Módulo de descripción.....	18
Figura 4: Scripts usados en el módulo 1.....	19
Figura 5: Módulo de Test.....	20
Figura 6: Módulo de control RA.....	21
Figura 7: Conexión convencional del brazo robótico.....	22
Figura 8: Conexión propuesta.....	23
Figura 9: Consumo de API.....	23
Figura 10: Python API.....	24
Figura 11: Calificación SUS.....	26
Figura 12: Latencia comunicación A.....	27
Figura 13: Latencia comunicación B.....	28

INFORMACIÓN GENERAL

Contextualización del tema

En el mundo digitalizado actual, la necesidad de mejorar la eficiencia de las diferentes industrias ha desencadenado en el uso e integración de diferentes tecnologías como la Inteligencia Artificial (IA), Realidad Virtual (RV), Robots Colaborativos (Cobots), Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés), Realidad Aumentada (RA), entre otras. Esta última, ha cobrado relevancia en los últimos años debido a su amplio espectro de aplicación. Entre sus principales ventajas, se puede mencionar que facilita la visualización de información crítica, en tiempo real, de sensores, optimiza procesos industriales, y facilita el control, así como manipulación de equipos y herramientas industriales.

Por otra parte, la robótica también ha experimentado cambios significativos a lo largo de los últimos años. Cada vez, se diseñan robots y plataformas de control que facilitan las tareas académicas e industriales de los seres humanos. El enfoque de esta investigación busca aprovechar las ventajas de la RA para operar de manera adecuada el robot UFACTORY Lite 6 en entornos industriales.

Desde un punto de vista tecnológico, este estudio se encuentra a la vanguardia con la integración de tecnologías 4.0. La unión de las tecnologías previamente mencionadas es un campo de crecimiento acelerado con avances prometedores, que se alinea con la innovación tecnológica que el Ecuador necesita. Si se habla de un entorno profesional, el diseño de un sistema de realidad aumentada para el control de un brazo robótico tiene el potencial de mejorar las operaciones de aquellas empresas que se encuentran en el camino de la automatización industrial. Proporcionar una interfaz intuitiva, con una explicación digitalizada del funcionamiento del brazo robótico puede reducir los errores humanos y aumentar la productividad.

Finalmente, desde un punto de vista educativo, este proyecto abre un abanico de posibilidades para mejorar el aprendizaje de los Cobots y AR. Brinda a los estudiantes la posibilidad de aprender conceptos complejos de una manera interactiva y práctica, rompiendo el paradigma de que la capacitación y entrenamiento en tecnologías emergentes es un proceso complejo y tedioso.

Problema de investigación

La operación del brazo robótico UFACTORY Lite 6 presenta desafíos importantes a nivel de industria y academia. La carencia de interfaces intuitivas que permitan su control sin la necesidad de usar un ordenador ha creado la necesidad de diseñar un sistema de RA para mejorar la experiencia de usuario y la dependencia de conexiones físicas complejas.

Objetivo general

- Desarrollar un sistema de realidad aumentada para el control del brazo robótico UFACTORY Lite 6.

Objetivos específicos

- Contextualizar los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo del sistema realidad aumentada.
- Desarrollar una interfaz que permita a los usuarios interactuar de manera eficiente con el robot UFACTORY Lite 6.
- Evaluar los atributos del sistema de realidad aumentada a través de un método de usabilidad.

Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos:

El desarrollo del presente trabajo será de utilidad ya que puede servir como un sistema de capacitación para el entendimiento del funcionamiento del brazo robótico UFACTORY Lite 6. Esto beneficiará a estudiantes, docentes y a la industria en general, brindando habilidades en el uso de tecnologías emergentes de la Industria 4.0. La sociedad involucrada en el desarrollo económico a nivel de industria se puede ver beneficiada ya que al tener operarios capacitados y nuevos prospectos de ingenieros, con habilidades tecnológicas de vanguardia, se impulsaría la competitividad e innovación en las empresas.

Finalmente, a través de la correcta documentación del diseño de este sistema de realidad aumentada, se compartirá el conocimiento mediante publicaciones de artículos científicos. Además, este documento servirá como una guía de usuario que estará disponible para la comunidad industrial y académica.

CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL ARTÍCULO PROFESIONAL

1.1. Contextualización general del estado del arte

La tele robótica, así como el guiado a distancia ofrecen grandes ventajas en la industria. En el caso de la tele ultrasonografía puede llevar servicios de medicina básicos a comunidades poco privilegiadas. Sin embargo, los métodos actuales tienen graves limitaciones, por lo que el uso de realidad aumentada y háptica se consideran opciones viables. El estudio desarrollado por (Black et al., 2024), ofrece una visión general del concepto de tele operación humana y su aplicación a la tele ultrasonografía. Describen un nuevo enfoque para la transmisión y el control remotos de los sistemas de ultrasonidos en el punto de atención independientemente de su fabricante, así como un sistema de comunicación de alta velocidad para las HoloLens 2 que es compatible con el acceso a la transmisión de sensores API ResearchMode. Los resultados muestran una mejora continua del sistema en comparación con trabajos anteriores en instrumentación, HCI y comunicación. Así pues, el sistema tiene un buen potencial para la tele ultrasonografía, así como para otras posibles aplicaciones de tele operación humana, como el mantenimiento, la inspección y la formación a distancia.

Con las tecnologías emergentes de la industria 4.0, la personalización masiva ha pasado de ser un dolor de cabeza a una realidad. Dentro de la industria manufacturera, la tarea de montaje es una de las operaciones más complejas. En el trabajo realizado por (Raj et al., 2024), se propone utilizar una técnica de RA basada en aprendizaje profundo. La detección automática de las piezas de la máquina fue desarrollada a través de una interfaz multimodal que implicaba tanto la mirada como el seguimiento de la mano para guiar el proceso de montaje manual de cada operario. Los resultados mostraron que el sistema de guiado propuesto permitió a 11 usuarios finales finalizar el montaje de un cilindro neumático en 55 s, con una puntuación media TLX inferior a 25 en una escala de 100 y una puntuación alfa de Cronbach de 0,8, lo que indica la convergencia de la experiencia de aprendizaje.

En el artículo presentado por (Black et al., 2024), se presenta y caracteriza un sistema de comunicación adecuado para la implementación de la tele operación humana en diversas condiciones de red, a través de Ethernet, Wi-Fi, 4G LTE y 5G. Con una muestra de 11 voluntarios, los cuales copiaron los gestos de un ecografista o radiólogo experto -a través de un sistema de realidad aumentada- para realizar un examen ecográfico, se hizo el seguimiento a la posición y la fuerza ejercida por la mano humana en respuesta a un cambio en el objetivo de realidad mixta. La latencia de la comunicación de ida y vuelta fue de 40 ± 10 ms en 5G, y de $1 \pm 0,6$ ms en Ethernet para rendimientos típicos. El tiempo de respuesta humana a un cambio de posición depende de la magnitud del paso, pero se situó entre 485 y 535 ms.

La interacción entre un humano y un robot desempeñan un papel importante en la academia e industria, los avances recientes con AR han brindado la posibilidad de mejorar este tipo de interacciones. Wu et al., (2024), explora la integración de sensores e interfaces desarrollados en AR para el control de robots. Desarrollaron un sistema de control de movimiento de robots intuitivo y ligero que permite a los usuarios manipular el movimiento de un robot mediante gestos de la mano representados por articulaciones de dedos dispersas en 3D. También se empleó una red neuronal para asignar articulaciones de dedos 3D a movimientos específicos del robot. Los resultados experimentales demuestran eficiencia en términos de reconocimiento preciso de los gestos de la mano y control intuitivo del movimiento del robot.

La representación virtual de brazos robóticos se ha popularizado en los últimos años, permitiendo la simulación y control eficiente de cada una de sus partes. En el caso de (de Boer et al., 2023), seleccionó una muestra de 24 participantes que utilizaron una configuración que incluía un brazo robótico Franka Emika Panda, un HMD (Head mounted display, por sus siglas en inglés) Varjo XR-3 y un controlador Leap Motion. Los participantes realizaron varias tareas para verificar si el sistema fue desarrollado de manera robusta. La tele operación utilizando una presentación 3D fue ventajosa en comparación con la tele operación utilizando un vídeo 2D. A pesar de los resultados alentadores, la interacción humana de forma directa sigue siendo un punto de referencia por superar.

Los micro robots son eficientes a la hora de adentrarse en espacios estrechos para vigilar infraestructuras, sin embargo, su potencia de cálculo es limitada. Por este motivo, (Fath et al., 2024), propone la fabricación de un micro robot con locomoción, este opera en una red formada por un casco de RA y un punto de acceso para supervisar infraestructuras mediante controladores hápticos de para la colaboración entre humanos y robots. Mediante la red propuesta, los datos visuales se envían en tiempo real a un concentrador conectado a un casco de realidad aumentada previa solicitud, que puede ser utilizado por el operador para supervisar y tomar decisiones sobre el terreno.

1.2. Proceso investigativo metodológico

Para el desarrollo de este trabajo, se empleó una investigación experimental con un enfoque mixto. Se establece como experimental debido a que dentro del desarrollo del sistema de realidad aumentada existen diferentes variables que son manipuladas, como por ejemplo el tiempo de respuesta en la evaluación planteada, los movimientos ejecutados por el brazo robótico y la usabilidad del sistema.

Por otra parte, el enfoque cuantitativo de esta investigación se justifica debido a que es un proceso secuencial y probatorio, el cual empezó con el diseño del sistema de realidad aumentada hasta la prueba de usabilidad. El enfoque cualitativo, se justifica debido a que la acción indagatoria fue dinámica a lo largo del desarrollo del trabajo.

Para la recolección de datos, se empleó la consulta y lectura de información de bases de datos científicas de prestigio como Scopus, IEEEExplore, Web of Science, entre otros. Por otra parte, para recabar la información transmitida entre dispositivos, se empleó el software Wireshark, el cual permite analizar el tráfico de redes, examinando y capturando datos en tiempo real que son transmitidos a través de una red (Sokolov et al., 2024).

Finalmente se usó la escala de usabilidad de un sistema (SUS, por sus siglas en inglés), la cual es un cuestionario a través del cual se evalúa cualquier aplicación, software, sistema, producto digital, entre otros, mediante la percepción técnica de los usuarios (Lukas et al., 2024).

CAPÍTULO II: ARTÍCULO PROFESIONAL

2.1. Resumen

La convergencia entre la realidad aumentada (RA) y el control robótico ha permitido que tanto industria como academia optimicen sus procesos, impulsando así una revolución en la interacción hombre-máquina. Desde cirugías asistidas por brazos robóticos de alta precisión hasta el uso de robots en entornos inmersivos para su aprendizaje y control, son los campos que han redefinido radicalmente la forma en que los seres humanos interactúan con tecnologías de vanguardia. Este artículo plantea el uso de una interfaz RA desarrollada en Unity 3D para el control, mediante un dispositivo móvil, del brazo robótico UACTORY Lite 6. Dos rutinas fueron implementadas, una simulación de un proceso de soldadura y otro de pick and place. Debido a que el lenguaje de programación nativo de Unity es c# y el SDK del robot está desarrollado en Python se optó por el uso de una API (interfaz de programación de aplicaciones). La usabilidad del sistema fue evaluada mediante el sistema de escala de usabilidad (SUS). Cinco expertos en electrónica y automatización voluntariamente evaluaron el sistema, obteniendo una calificación de 73.5. Finalmente, mediante Wireshark se evaluó la latencia entre el dispositivo móvil y el brazo robótico, el tiempo de respuesta promedio fue de 4.39 milisegundos.

a. Palabras clave:

Realidad aumentada, Cobots, API, Unity 3D.

2.2. Abstract

The convergence between augmented reality (AR) and robotic control has allowed industry and academia to optimize their processes, thus driving a revolution in human-machine interaction. Radical ways that redefined the way humans interact with cutting-edge technologies go from surgeries assisted by high-precision robotic arms to employing robots in immersive environments for learning and control. This paper proposes using an AR interface developed in Unity 3D for the control, through a mobile device, of the robotic arm UACTORY Lite 6. Two routines were implemented, one simulating a welding process and the other a pick-and-place process. Since Unity's native programming language is c# and the robot's SDK is developed in Python, the use of an API (application programming interface) was chosen. The system's usability was evaluated using the usability scale system (SUS). Five experts in electronics and automation voluntarily evaluated the system, obtaining a score of 73.5. Finally, using Wireshark, the latency between the mobile device and the robotic arm was evaluated. The average response time was 4.39 milliseconds.

a. Keywords

Augmented reality, Cobots, API, Unity 3D.

2.3. Introducción

En el mundo digitalizado actual, la necesidad de mejorar la eficiencia de las diferentes industrias ha desencadenado en el uso e integración de diferentes tecnologías como la Inteligencia Artificial (IA), Realidad Virtual (RV), Robots Colaborativos (Cobots), Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés), Realidad Aumentada (RA), entre otras (Wanyama et al., 2024). Esta última, ha cobrado relevancia en los últimos años debido a su amplio espectro de aplicación. Entre sus principales ventajas, se puede mencionar que facilita la visualización de información crítica, en tiempo real, de sensores, optimiza procesos industriales, y facilita el control, así como manipulación de equipos y herramientas industriales (Soori et al., 2024).

Por otra parte, la robótica también ha experimentado cambios significativos a lo largo de los últimos años. Esto se refleja en el diseño de plataformas de control y robots creados con la finalidad de optimizar las actividades que realizan los seres humanos a nivel de industria, como por ejemplo en atmósferas explosivas, en lugares a los que no pueden acceder, en actividades complejas y de alto riesgo como en intervenciones quirúrgicas, o simplemente en actividades repetitivas (Alaudeen et al., 2024; Mazzola et al., 2024). A nivel de academia e investigación, este campo de la tecnología también ha tenido un impacto importante, permitiendo obtener diferentes enfoques y nuevos usos de plataformas robóticas, como el uso de brazos robóticos como asistentes de laboratorio, manipulación de químicos o procesos de soldadura (Wright et al., 2024).

Como se puede apreciar, la robótica ha transformado de manera radical la manera en la que los seres humanos interactúan con los procesos y máquinas, ofreciendo soluciones altamente eficientes y avanzadas tanto a nivel de industria como de academia, obligándolos a mantenerse actualizados y competentes a nivel tecnológico, para ser ellos quienes gobiernen las plataformas robóticas y no al contrario.

Por lo descrito en párrafos anteriores, este estudio busca mantenerse a la vanguardia tecnológica con la integración de RA y el Cobot UFACTORY Lite 6 para mejorar la experiencia de usuario y la dependencia de conexiones físicas complejas. El diseño de un sistema de realidad aumentada para el control de un brazo robótico tiene el potencial de mejorar las operaciones de aquellas empresas que se encuentran en el camino de la automatización industrial. Proporcionar una interfaz intuitiva, con una explicación digitalizada del funcionamiento del brazo robótico puede reducir los errores humanos y aumentar la productividad.

Finalmente, este estudio abre un abanico de posibilidades para mejorar el aprendizaje de los Cobots y RA. Brinda a los estudiantes la posibilidad de aprender conceptos complejos de una manera

interactiva y práctica, rompiendo el paradigma de que la capacitación y entrenamiento en tecnologías emergentes es un proceso complejo y tedioso.

2.4. Metodología

2.4.1. Revisión de los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo del sistema realidad aumentada.

Para poder desarrollar tecnologías 4.0 como RA, es necesario el uso de motores gráficos. Uno de los más populares a nivel mundial es Unity, el cual, en un inicio fue destinado para el desarrollo y creación de videojuegos. Sin embargo, con el rápido avance tecnológico, este motor adaptó otros usos como simulaciones industriales, desarrollo de aplicaciones para diversas plataformas móviles, experiencias tanto en 2D como 3D para la creación de RV y RA. Fue desarrollado por Unity Technologies y es conocido a nivel mundial debido a su flexibilidad y versatilidad, además de que su curva de aprendizaje es baja, lo que facilita el acceso a desarrolladores principiantes como a personal con experiencia (Wijaya et al., 2024).

Unity, posee un motor de física que permite que las simulaciones desarrolladas sean más realistas, administrando de manera eficiente interacciones entre las fuerzas de la naturaleza con los objetos de juego. Emplea el lenguaje de programación C#, sin embargo, en versiones anteriores su scripting se basaba en JavaScript. Además, proporciona una extensa variedad de modelos 3D, recursos predefinidos y varios complementos, los cuales pueden ser adquiridos en su tienda virtual (Bonali et al., 2024; Toasa et al., 2024).

Sin embargo, este motor gráfico no puede, por sí mismo generar RA, por lo que es necesario un complemento, aquí es donde aparece Vuforia, la cual es una plataforma enfocada en el desarrollo de RA, provee herramientas y kits de desarrollo de software (SDK, por sus siglas en inglés) para complementar la experiencia de RA con diferentes plataformas móviles. Fue desarrollada por PTC y es una de las plataformas más empleadas a nivel mundial para el desarrollo de entornos inmersivos (Rivera et al., 2021).

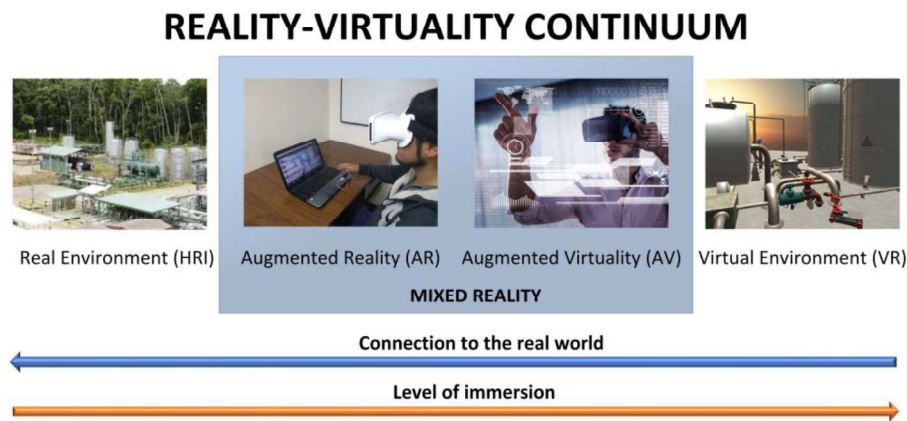
Permite la creación de marcadores, los cuales se definen como imágenes que sirven de referencia para superponer el contenido digital en un escenario real. Estos marcadores no se limitan solo al uso de imágenes, pueden ser elementos 3D e incluso videos. Es compatible con Unity y otros motores gráficos, lo que permite que los desarrolladores tengan varias opciones a la hora de generar su contenido (Aguas et al., 2022).

Con estos antecedentes, es prudente definir la RA, la cual es una tecnología que permite percibir a un entorno del mundo real, a través de un dispositivo externo como gafas, celulares, computadores, etc., en el cual se encuentran superpuestos objetos virtuales con los cuales se puede

interactuar. Para explicar de mejor manera la definición y aplicabilidad de la RA, Paul Miligram y Fumio Kuishino (Naranjo et al., 2018), crearon un continuo de la virtualidad, el cual describe de manera gráfica la transición de un entorno completamente virtual a un entorno netamente real. Aquí, la RA se encuentra más cerca de la realidad, mientras que la virtualidad aumentada (VA) está más cerca de un mundo completamente digitalizado. Esto se puede apreciar en la figura 1.

Figura 1:

Continuo de la virtualidad.



Entre las características clave de la RA, se puede mencionar que necesariamente utiliza sensores externos como cámaras para captar la información del entorno real al que se está haciendo referencia. Además, emplea algoritmos de visión por computadora para detectar los marcadores generados por plataformas como Vuforia, esto permite que se procesen imágenes en tiempo real para conseguir un seguimiento exacto (Tiwari et al., 2024).

Por otra parte, también usa motores de renderizado para combinar de manera eficiente los elementos creados por computadora con el mundo real. Para esto, también es necesario que se establezca un sistema de coordenadas para relacionar la posición y orientación de la cámara o dispositivo que se esté empleando. Si es que se desea crear una experiencia completa con RA, se puede también generar conectividad con la nube para poder captar datos en tiempo real, haciendo a cualquier sistema más dinámico (Naranjo et al., 2020, 2022).

Dentro de la industria 4.0, el uso de nuevas tecnologías en la industria es cada vez más necesario, la RA, RV, IA, Cobots entre otras, se han convertido en herramientas esenciales para la optimización de procesos, sin embargo, se puede obtener mayores ventajas si estas tecnologías trabajan en conjunto. Por ejemplo, la integración de RA con Cobots es un campo amplio que se encuentra poco explorado.

Entre los robots colaborativos más versátiles y accesibles se encuentra el UFACTORY Lite 6, el cual es un brazo robótico de alto rendimiento. Tiene las características ideales para un desempeño óptimo a nivel de industria y academia, su versatilidad le brinda un funcionamiento seguro y adaptable, llegando a tener una comunicación sencilla con otros tipos de robots para la creación de células de trabajo. Sus componentes garantizan movimientos estables con una velocidad máxima de 500 mm/s con un alcance de 440 mm. Posee entradas y salidas tanto analógicas como digitales con estándar industrial. La carga útil es de hasta 1 kg y el brazo, generalmente, se adquiere juntamente con una pinza de dos dedos y una pinza de vacío que son adecuadas para diversas tareas. Posee 6 grados de libertad, en la tabla 1 se muestra el rango de movimiento de cada uno de sus ejes. Además, la composición de hardware del robot incluye al brazo robótico, el adaptador de corriente y un botón de paro de emergencia (Shahria et al., 2023).

Tabla 1:

Rango de trabajo de cada junta.

Junta	Rango
Primer eje	+360 °
Segundo eje	+150 °
Tercer eje	-3.5 ° ~ 300 °
Cuarto eje	+360 °
Quinto eje	+124 °
Sexto eje	+360 °

La interfaz sencilla y altamente intuitiva hace de este brazo robótico ideal para el uso de principiantes e ingenieros con experiencia. Tiene un sistema de código abierto que permite programar cualquier movimiento mediante lenguajes de programación como Python, C++ y ROS. Se controla a través de UFACTORY Studio, que puede ser manejado desde distintos sistemas operativos como Ubuntu, Windows y macOS (Avila et al., 2022).

Cuando se trabaja con diferentes plataformas, siempre surge el problema de comunicación bidireccional entre estas, ya que generalmente manejan diferentes lenguajes de programación, para solucionar estos problemas surgen las API`s (interfaz de programación de aplicaciones) las cuales son un conjunto de reglas que permite que diferentes lenguajes de programación se comuniquen de manera eficiente entre sí. En términos simples, se la puede definir como un intermediario que permite la intercomunicación entre diferentes aplicaciones. La ventaja que subyace tras este concepto es el hecho de que, al momento de realizar dicha comunicación, no se necesita comprender los detalles

internos de cada aplicación, facilitando su integración y permitiendo desarrollar aplicaciones complejas (Mahmoud et al., 2024).

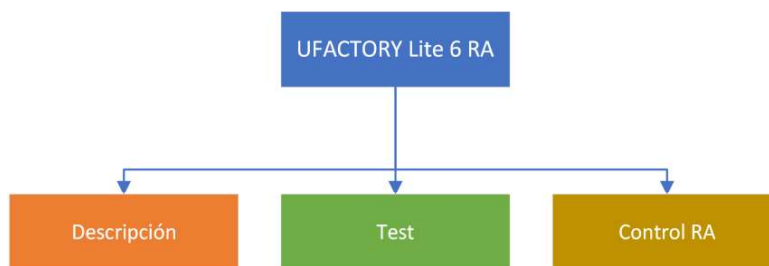
Posee endpoints que son URLs que están relacionados con operaciones concretas, como el envío y recepción de información. Además, utilizan métodos GET, POST, PUT, entre otros, con la finalidad de especificar las acciones a realizarse para cada recurso. Finalmente, se puede mencionar que las respuestas de la API son de tipo JSON o XML, lo que hace del procesamiento de información una tarea sencilla (Sven et al., 2019).

2.4.2. Diseño del sistema RA

Las escenas diseñadas en Unity 3D permiten al usuario entender la secuencia del sistema e interactuar con cada uno de los elementos propuestos. La interactividad propia de este software facilita la identificación de relaciones y funciones entre los elementos, brindando una experiencia enriquecedora a cada uno de los usuarios. En la figura 2, se observa que este sistema está compuesto por tres módulos: i) Descripción del brazo robótico, en el cual el usuario va a entender conceptos claves sobre el UFCATORY Lite 6, ii) Test, en donde se tiene que poner a prueba lo entendido en el módulo anterior; y iii) Control RA, en donde se podrá manipular al brazo robótico.

Figura 2:

Diagrama jerárquico del sistema RA.

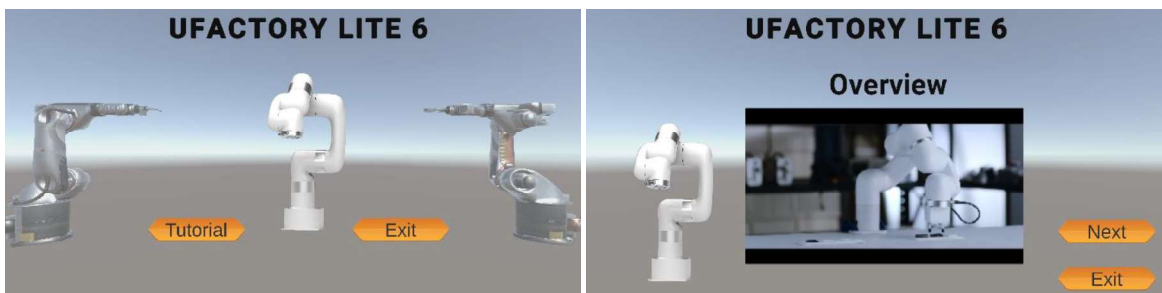


Cuando se inicializa el sistema, el usuario se encuentra con el módulo de Descripción. Aquí, la primera escena es la pantalla principal, en donde el usuario puede escoger entre salir del sistema o continuar con el tutorial. Esta escena fue diseñada de tal manera que el usuario sienta que está inmerso en un entorno de manipulación de robots industriales. Posterior a esto, se dirigirá a una segunda pantalla en donde se despliega un video, el cual le brindará las características esenciales del UFACTORY Lite 6, de igual manera, en esta escena se presentan dos botones, uno para continuar y otro para salir. Esta lógica se repite en todas las pantallas del primer módulo.

A continuación, se presenta una escena en donde a través de un audio y una matriz, se presentan los parámetros de movimiento del brazo robótico. El audio le proporciona información adicional sobre los comandos de movimiento, así como la velocidad de rotación y velocidad lineal máxima de cada uno de sus ejes. Finalmente, el usuario interactúa con una pantalla en donde se muestra el diagrama de conexión del UFACTORY Lite 6 con una computadora. Nuevamente, a través de un audio se explica de manera detalla la composición de hardware del brazo robótico, así como la instalación e inicialización básica del brazo robótico. Lo descrito anteriormente, se puede apreciar en la figura 3.

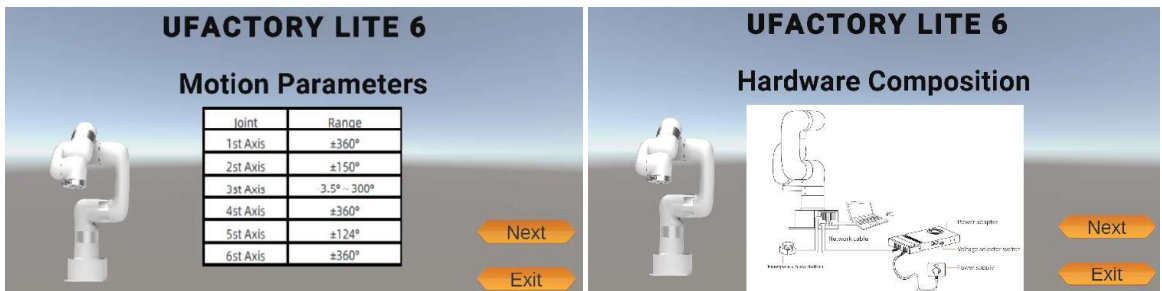
Figura 3:

Módulo de descripción.



a) Escena inicial.

b) Características del UFACTORY Lite 6.



b) Parámetros de movimiento.

d) Composición de Hardware.

La programación de los botones que se muestran en este módulo se los hizo a través de C#, lenguaje de programación nativo de Unity. Para poder cambiar de escena se empleó el archivo “level-manager”. En las cuatro primeras líneas se puede observar las librerías necesarias para el correcto funcionamiento de este script. Se ha creado un método público que recibe un parámetro tipo cadena, el cual va a ser el nombre de la escena a la que se quiera dirigir el usuario. Además, se usa el método LoadScene de la clase SceneManager para cargar una escena en Unity. Para poder salir de la aplicación, se empleó el método Quit de la clase Application. Este método es específico de las aplicaciones Unity y termina la ejecución de cualquier simulación. Todo esto se muestra en la figura 4.

Figura 4:

Scripts usados en el módulo 1.

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.SceneManagement;

Script de Unity (6 referencias de recurso) | 0 referencias
public class Level_man : MonoBehaviour {

    // Use this for initialization
    Mensaje de Unity | 0 referencias
    void Start () {

    }
    // Update is called once per frame
    Mensaje de Unity | 0 referencias
    void Update () {

    }
    0 referencias
    public void CargaNivel(string NombreNivel)
    {
        SceneManager.LoadScene(NombreNivel);
    }
}
```

a) Level_manager.

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

Script de Unity (5 referencias de recurso) | 0 referencias
public class quit: MonoBehaviour {

    // Update is called once per frame
    0 referencias
    public void Exit () {

        // UnityEditor.EditorApplication.isPlaying = false;
        Application.Quit();
        Debug.Log("se ha salido");
    }
}
```

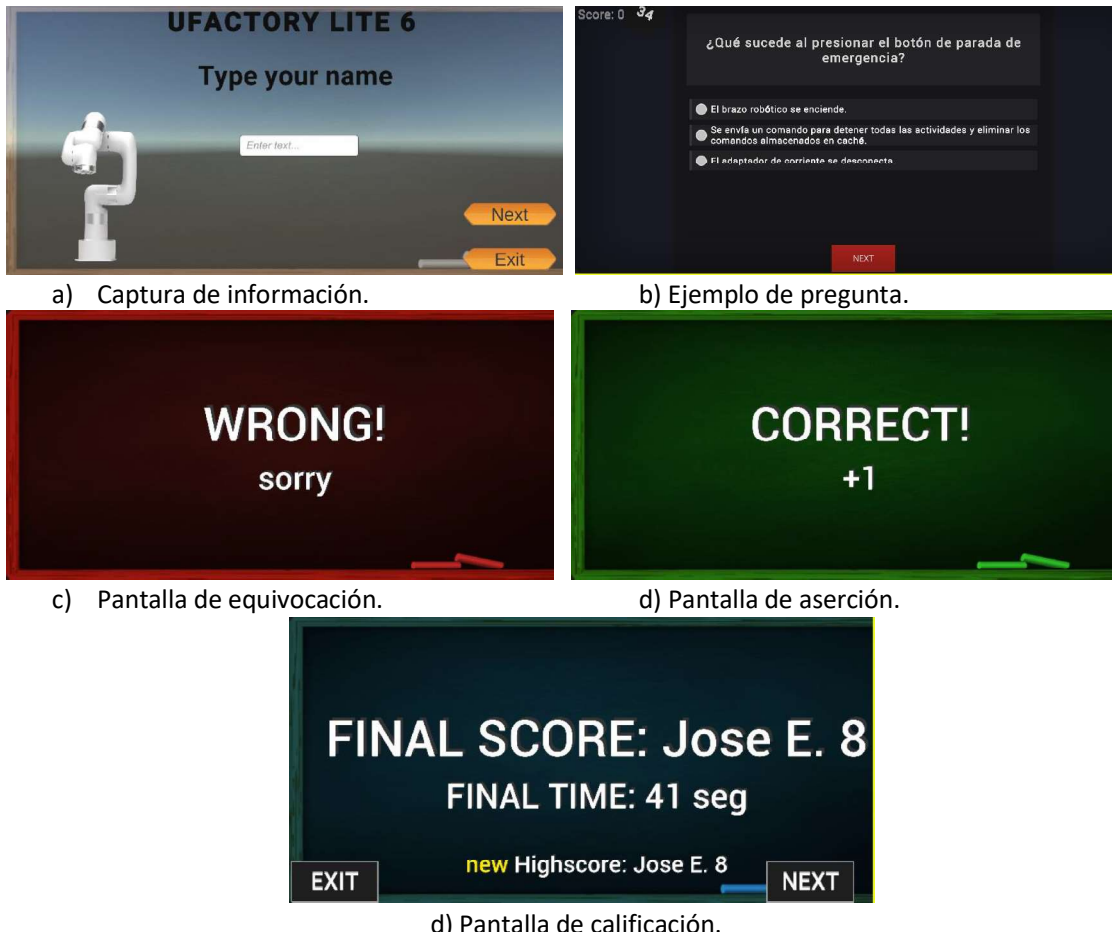
b) quit.

Todo lo que se describe a continuación, se muestra la figura 5. La pantalla inicial del módulo 2, presenta una entrada de texto para que el usuario pueda ingresar su nombre, esto permitirá identificar a la persona que está usando el sistema y grabar su puntuación. Una vez que estos datos se hayan registrado, se puede acceder a un conjunto de diez preguntas, las cuales van a mostrarse de manera secuencial. Estas preguntas hacen referencia a toda la información presentada en el módulo 1. Además, fueron validadas por un experto. Cada escena en donde se presentan los cuestionamientos tiene tres opciones de respuesta y un tiempo de 40 segundos para poder completarlas. En el caso de que el usuario no haya respondido en el tiempo preestablecido, la pregunta se marca como incorrecta y se continúa a la siguiente.

Además, el sistema en este módulo presenta un audio que representa el conteo del tiempo asignado para cada pregunta. Por otra parte, también, en la esquina superior izquierda, se muestra el puntaje acumulado del participante. En el caso de que el usuario responda de manera incorrecta, aparecerá una pantalla flotante que lo alerte sobre su equivocación, mientras que, si el usuario responde de manera adecuada, aparecerá otra pantalla que refuerce su aserción. Todas las preguntas, así como las opciones de respuesta está diseñadas de tal manera que su orden es aleatorio.

Figura 5:

Módulo de Test.



Quando el usuario finaliza esta evaluación, aparece una pantalla la cual muestra su calificación final, el nombre del usuario y el tiempo ocupado. Además, en la parte inferior, se muestra el usuario que previamente obtuvo la calificación más alta, de esta manera se tiene un control de todas las personas que han interactuado con el sistema, así como su desempeño y retención de conocimientos.

En el módulo 3, el sistema va a abrir automáticamente la cámara, en donde se mostrará el entorno real sobre el que el usuario se encuentre interactuando. Una vez que la cámara capture el marcador establecido, aparecerá un menú, en el cual se va a poder seleccionar entre dos procesos. Para esta investigación, se ha simulado dos casos. El primero corresponde a un movimiento circular del brazo robótico, debido a que solo se dispone de la pinza de succión, este desplazamiento ha sido designado como un proceso de soldadura. Por otra parte, el segundo proceso es de "pick and place", el cual recoge un elemento colocado a su lado derecho y lo deja en el lado izquierdo.

Cuando el usuario seleccione el proceso que desea realizar, va a verse inmerso en otra escena, la cual va a mostrar un botón de inicio del proceso. Cuando se inicialice lo mencionado, el brazo robótico va a moverse en tiempo real, mientras que dentro de la interfaz se mostrará también el movimiento del robot. Cuando el usuario verifique que los procesos se han completado, puede navegar entre ellos o a su vez puede escoger finalizar el sistema. Esto se puede verificar en la figura 6.

Figura 6:

Módulo de control RA.



a) Menú de procesos.



b) Menú de inicialización.

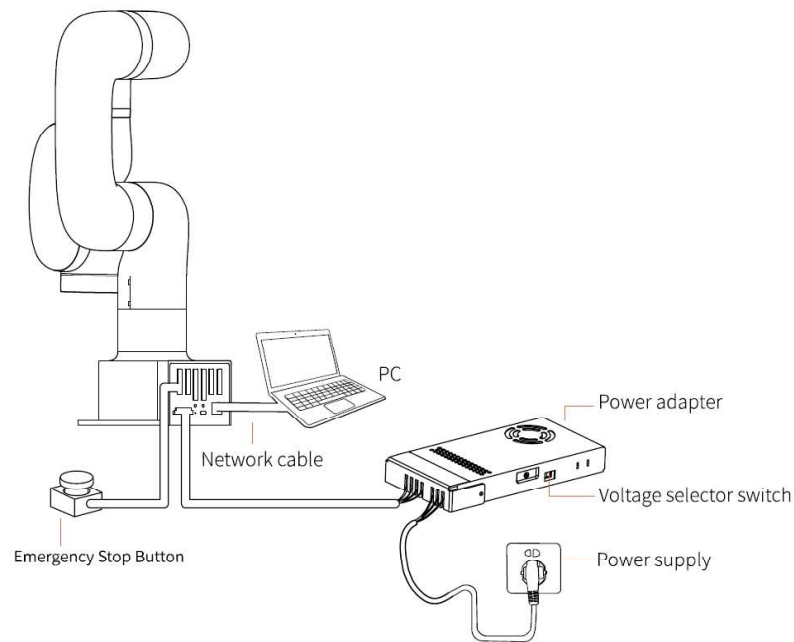
2.4.3. Conexión del sistema

El brazo robótico UFACTORY Lite 6, es un robot colaborativo (cobot) diseñado para desempeñarse en entornos intervenidos por seres humanos. Sin embargo, al ser un cobot, opera de manera eficiente y segura, sin la necesidad de colocar barreras de seguridad adicionales para salvaguardar vidas humanas. Su versatilidad, le permite ser aplicados en varios sectores que pueden ir desde el campo médico, pasando por la industria manufacturera, hasta ser empleado en proyectos netamente investigativos (Avila et al., 2022).

Aunque este robot puede ser controlado de manera eficiente mediante una interfaz de computadora convencional (a través de cable de red), como se muestra en la figura 7, el uso de RA ofrece beneficios adicionales, los cuales se describen a continuación.

Figura 7:

Conexión convencional del brazo robótico.

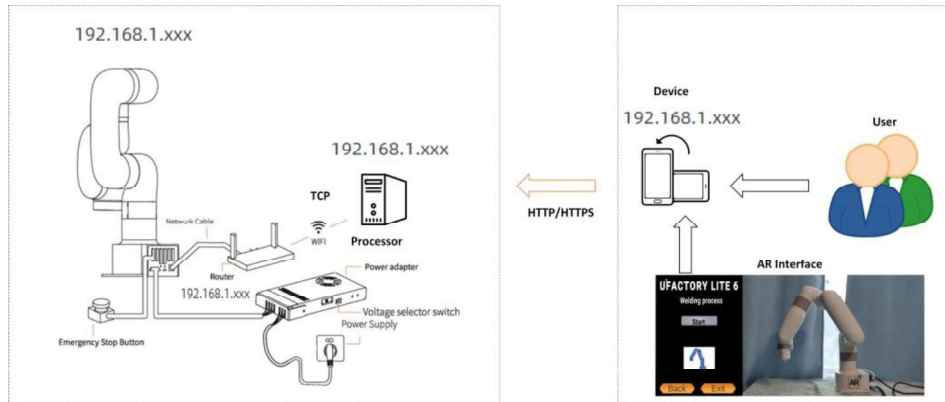


- La RA genera una interfaz intuitiva y con una mejor visualización, por lo que la interacción con el brazo robótico puede ser más eficiente. Los usuarios u operarios pueden visualizar y manipular en tiempo real el robot.
- El sistema desarrollado puede ser empleado como una herramienta de entrenamiento, permitiendo la formación sobre el uso del robot. De esta manera se evita la necesidad de manuales extensos, por lo que la curva de aprendizaje se reduce.
- Al emplear dispositivos móviles, se ofrece una mayor flexibilidad y movilidad en comparación con interfaces desarrolladas específicamente para computadora.

La integración de RA con el brazo robótico en estudio puede mejorar la experiencia de usuario y ofrece ventajas significativas cuando se habla de entrenamiento (aprendizaje de robótica) y flexibilidad operativa. La propuesta de conexión de este estudio se presenta en la figura 8. El brazo robótico por defecto viene configurado con la IP 192.168.1.186 por lo que es necesario levantar una red local de tal forma que el procesador y el móvil se encuentren en la misma subred.

Figura 8:

Conexión propuesta.



Una vez que el usuario presione el botón para inicializar cualquiera de los dos procesos propuestos, se ejecuta un script en c#, el cual contiene el código mostrado en la figura 9. Se utiliza la biblioteca HttpClient de .NET para realizar una solicitud HTTP GET a la API creada. En primer lugar, se define la URL de la API, y posteriormente se crea un método para consumir la API de manera asíncrona. Luego, se crea una instancia HttpClient para realizar la solicitud HTTP, se realiza la solicitud HTTP GET y se verifica si esta fue exitosa. A continuación, se lee el contenido de la respuesta como una cadena de texto, para posteriormente lograr imprimir el resultado, sin embargo, si la solicitud no fue exitosa, se imprime un mensaje de error. Finalmente, se usa “async void” para “Consume” para que la interfaz de usuario de Unity no se bloquee.

Figura 9: Consumo de API.

Consumo de API.

```
public async void Consume()
{
    using (HttpClient client = new HttpClient())
    {
        try
        {
            HttpResponseMessage response = await client.GetAsync(apiUrl);
            if (response.IsSuccessStatusCode)
            {
                string result = await response.Content.ReadAsStringAsync();
                Debug.Log(result);
            }
            else
            {
                Debug.LogError($"Error: {response.StatusCode}");
            }
        }
        catch (Exception ex)
        {
            Debug.LogError($"Exception: {ex.Message}");
        }
    }
}
```

El brazo robótico brinda un conjunto de herramientas que permiten a los desarrolladores controlarlo de manera adecuada. El kit de desarrollo (SDK, por sus siglas en inglés) está implementado en Python. Por otra parte, como se mencionó anteriormente, el lenguaje de programación que rige a

Unity es C#. Por este motivo, al tener dos lenguajes de programación diferentes en ambos extremos, es necesario el uso de un intermediario, es decir, la API. Esta es un conjunto de reglas y protocolos que permiten una comunicación estructurada. El desarrollo se muestra en la figura 10.

Figura 10:

Python API.

```
import traceback
import threading
from xarm import version
from xarm.wrapper import XArmAPI
from fastapi import FastAPI
from main import RobotMain
from pick import RobotPick

app = FastAPI()

@app.get("/welding")
def weld():
    RobotMain.pprint('xArm-Python-SDK Version:{}'.format(version.__version__))
    arm = XArmAPI( port: '192.168.1.186', baud_checkset=False)
    robot_main = RobotMain(arm)
    robot_main.run()
    return "Proceso completo"

@app.get("/pick")
def pick():
    RobotPick.pprint('xArm-Python-SDK Version:{}'.format(version.__version__))
    arm = XArmAPI( port: '192.168.1.186', baud_checkset=False)
    robot_main = RobotPick(arm)
    robot_main.run()
    return "Proceso completo"
```

Se utiliza el framework FastAPI para definir dos rutas (/welding y /pick) que están asociadas a funciones. Estas funciones, a su vez, interactúan con con el brazo robótico utilizando la biblioteca xarm y ejecutan los procesos mencionados en secciones anteriores. En las primeras líneas se importan varias librerías necesarias para el correcto funcionamiento del script. Entre ellas se encuentra la manipulación de hilos y la biblioteca xarm.

Se crea en primer lugar la instancia FastAPI para definir las rutas y funciones. Cuando se accede a cualquiera de las rutas previamente definidas, mediante la solicitud HTTP GET, se ejecuta la función adecuada (weld (), pick ()), se imprime la versión de la biblioteca xarm que se está empleando, posteriormente, se crea una instancia XArmAPI con la dirección IP '192.168.1.186' y se deshabilita la verificación del baud rate. Se crea una instancia de la clase RobotMain o RobotPick, según se haya seleccionado el proceso, pasándole el objeto arm. Finalmente se ejecuta el método run () y se imprime la cadena Proceso Completo. Es necesario mencionar que las clases RobotMain y Robot Pick poseen los métodos adecuados para que el brazo robótico se mueva de acuerdo con la orden enviada.

Estas órdenes son enviadas directamente al robot, a través del protocolo TCP, el cual es un protocolo de comunicación confiable y que se encuentra en la capa de transporte del modelo OSI. Brinda comunicación bidireccional punto a punto y, además, la transmisión de datos se la hace de manera ordenada y sin pérdida alguna. Debido a que en la documentación del brazo robótico se menciona que se usa TCP privado, se puede inferir que es un protocolo propietario, por lo que los demás detalles no son de acceso público. La interfaz de red del robot es Gigabit Ethernet, lo que significa que este puede transmitir información a velocidades de hasta 1 gigabit por segundo (Trujillo et al., 2024), lo que es beneficioso para cualquier aplicación robótica tanto dentro de industria como de academia.

2.5. Resultados – Discusión

2.5.1. Evaluación de usabilidad

Con la finalidad de poner a prueba el sistema desarrollado, se solicitó la participación de personas que tengan conocimientos básicos sobre ingeniería electrónica y automatización. 5 personas accedieron a probar el sistema. Se formuló la siguiente pregunta de investigación:

- ¿El sistema propuesto es usable para el control del brazo robótico UFACTORY Lite 6?

Se planteó el SUS para evaluar la usabilidad del sistema, este sistema fue creado por Brooke en 1996 y se basa en la aplicación de 10 preguntas, las cuales son evaluadas con una escala de Likert, donde 1 representa totalmente desacuerdo y 5 representa totalmente de acuerdo. Esta escala califica el sistema desarrollado con una calificación entre 0 y 100. Una calificación igual o mayor a 80 representa un sistema eficiente y que cumple de manera adecuada su propósito, además se le asigna una nota de A. Para aquellos sistemas que obtienen una puntuación entre 70 y 80 se les asigna una nota de B, y se los considera aceptables, pero con espacio a mejoras. Cuando un sistema obtiene una calificación entre 50 y 70 se lo considera ineficiente, y se le asigna una nota de C. Finalmente, para los sistemas que obtienen una calificación inferior a 50 se les asigna una nota de D, y son considerados poco funcionales (Naranjo et al., 2023).

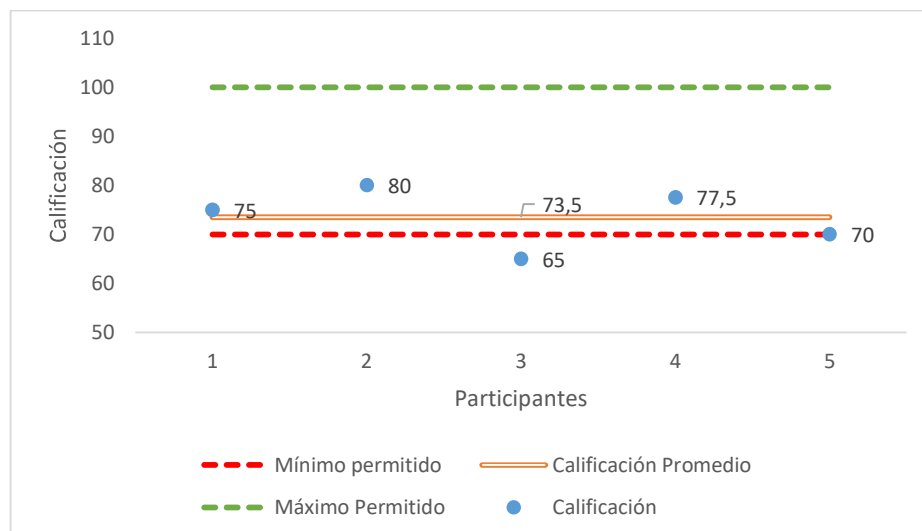
La calificación total de este sistema se basa en un cálculo sencillo. Es necesario tener en cuenta que, de las 10 preguntas, 5 se clasifican como preguntas positivas (impares) y 5 se clasifican como negativas (pares). Se suman los resultados de las preguntas impares y a ese valor se resta 5. Por otra parte, a 25 se le resta la suma de las respuestas de las preguntas pares. Finalmente, se suman ambos resultados y se multiplica por 2.5. Este último paso es imperativo para obtener una puntuación en una escala de 0 a 100. Debido a este rango de resultados, suele confundirse con un porcentaje, el cual no lo es. Las preguntas que se incluyen en este cuestionario son (Caiza et al., 2021):

1. Creo que me gustaría utilizar este sistema con frecuencia.
2. El sistema me ha parecido innecesariamente complejo.
3. Creo que el sistema es fácil de usar.
4. Creo que necesitaría el apoyo de un técnico para poder utilizar este sistema.
5. Me pareció que las distintas funciones del sistema estaban bien integradas.
6. Me pareció que había demasiadas incoherencias en este sistema.
7. Imagino que la mayoría de la gente aprendería a utilizar este sistema muy rápidamente.
8. El sistema me pareció muy incómodo de usar.
9. Me sentí muy seguro usando el sistema.
10. Tuve que aprender muchas cosas antes de empezar a utilizar el sistema.

Una vez que se explicó a los usuarios sobre el SUS, se les entregó el cuestionario. Cuando los cinco participantes lo completaron se procedieron a tabular los resultados. Se obtuvo un promedio de 73.5, lo que, según la metodología implementada, muestra que el sistema de RA es aceptable y funcional para el propósito que fue desarrollado, esto responde a la pregunta de investigación planteada. Sin embargo, a pesar de que esta calificación es alentadora, hay varios aspectos a mejorar. Entre ellos se encuentra la navegación entre escenas, la cual debe ser más intuitiva y restringida dependiendo el caso. Además, entre las sugerencias de los encuestados, se menciona que el campo para ingresar el nombre de usuario (necesario para acceder al módulo 2 del sistema) debe tener un tamaño adecuado para que no exista errores de selección ni de tipeo. Finalmente, se sugiere aumentar los datos e información mostrada en el módulo 3. Las calificaciones obtenidas por cada uno de los participantes, puede ser consultada en la figura 11.

Figura 11:

Calificación SUS.



2.5.2. Análisis en Wireshark

Wireshark es una herramienta que permite, bajo responsabilidad del usuario, analizar el tráfico de red en tiempo real. Es de código abierto y trabaja en diferentes plataformas como Windows, macOS y Linux. Admite el estudio de un amplio espectro de protocolos de comunicación desde interfaces de red inalámbricas o ethernet (Naranjo et al., 2018). Por lo mencionado, se empleó esta herramienta para filtrar la información enviada desde el dispositivo móvil al procesador y desde el procesador al brazo robótico UFACACTORY Lite 6.

Para la primera parte, la cual se ha denominado comunicación A, se filtraron las direcciones IP con el comando: `ip.addr == 192.168.1.105 && ip.dst == 192.168.1.104 && http`. Esta personalización permite una comprensión adecuada y adaptada a los requisitos del escenario en el que se está trabajando. La primera orden enviada fue una solicitud HTTP GET para la simulación del proceso de soldadura. La latencia entre las IP seleccionadas fue de 4.57 milisegundos. Posterior a esto, se ejecutó una solicitud HTTP GET para la simulación del proceso de pick and place, donde la latencia fue de 0.599 milisegundos. Estos resultados preliminares reflejan eficiencia en la transmisión de la información deseada. Con estos datos, se entiende que existe una comunicación fluida entre ambos dispositivos, destacando la robustez de la comunicación creada. Esto se puede apreciar en la figura 12.

Figura 12:

Latencia comunicación A.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
91	2.955826	192.168.1.105	192.168.1.104	HTTP	129	GET /welding HTTP/1.1
3513	33.718369	192.168.1.105	192.168.1.104	HTTP	102	GET /pick HTTP/1.1

Interface id: 0 (\Device\NPF_{D668D3B7-0EB4-49D4-BCB4-78F595380435})
Interface name: \Device\NPF_{D668D3B7-0EB4-49D4-BCB4-78F595380435}
Interface description: Wi-Fi
Encapsulation type: Ethernet (1)
Arrival Time: Mar 2, 2024 16:15:17.401177000 Hora est. Pacífico, Sudamérica
UTC Arrival Time: Mar 2, 2024 21:15:17.401177000 UTC
Epoch Arrival Time: 1709414117.401177000
[Time shift for this packet: 0.000000000 seconds]
[Time delta from previous captured frame: 0.004571000 seconds]
[Time delta from previous displayed frame: 0.000000000 seconds]
[Time since reference or first frame: 2.955826000 seconds]

Para la segunda parte, la cual se ha denominado comunicación B, se llevó a cabo la selección de las direcciones IP mediante el comando: `(ip.addr == 192.168.1.104 && ip.dst == 192.168.1.186) && (frame.number == 92 || frame.number == 3514)`. La orden por analizar en este caso fue la 92, la cual corresponde a la solicitud del proceso de soldadura. Aquí, la latencia para la comunicación entre el procesador y el brazo robótico fue de 1.971 milisegundos. Posteriormente se analizó la orden 3514,

la que corresponde al proceso de pick and place. La latencia observada fue de 1.645 milisegundos. Esto representa una capacidad de respuesta prácticamente inmediata, por lo que el brazo robótico no presenta dificultades para ejecutar las órdenes enviadas. Ver figura 13.

Figura 13:

Latencia comunicación B.

(ip.addr == 192.168.1.104 && ip.dst == 192.168.1.186) && (frame.number == 92 || frame.number == 3514)

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
92	2.957797	192.168.1.104	192.168.1.186	TCP	66	51439 → 502 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 WS=256 SACK_PERM
3514	33.720014	192.168.1.104	192.168.1.186	TCP	66	51463 → 502 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 WS=256 SACK_PERM

v Interface id: 0 (\Device\NPF_{D668D3B7-0EB4-49D4-BCB4-78F595380435})
 Interface name: \Device\NPF_{D668D3B7-0EB4-49D4-BCB4-78F595380435}
 Interface description: Wi-Fi
 Encapsulation type: Ethernet (1)
 Arrival Time: Mar 2, 2024 16:15:17.403148000 Hora est. Pacífico, Sudamérica
 UTC Arrival Time: Mar 2, 2024 21:15:17.403148000 UTC
 Epoch Arrival Time: 1709414117.403148000
 [Time shift for this packet: 0.000000000 seconds]
 [Time delta from previous captured frame: 0.001971000 seconds]
 [Time delta from previous displayed frame: 0.000000000 seconds]
 [Time since reference or first frame: 2.957797000 seconds]

CONCLUSIONES

A través de una búsqueda en bases de datos de prestigio como Scopus, IEEEXplore, MDPI, SpringerLink, se contextualizaron trabajos relacionados, así como fundamentos teóricos. Esto sentó las bases para el desarrollo del presente trabajo de investigación. Contar con información de calidad, no solo brinda un sustento teórico de primera mano para realizar cualquier investigación, sino que también permite analizar trabajos actuales que facilitan el entendimiento de la dirección que está tomando uso de tecnologías 4.0

Se ha desarrollado una interfaz interactiva en Unity 3D. El uso de motores gráficos con curvas de aprendizaje reducidas facilita la creación de escenas amigables para el usuario final. Además, la integración de complementos como VUFORIA para la creación de realidad aumentada, es de vital importancia a la hora de superponer información en un entorno real.

Manejar los protocolos de comunicación adecuados, así como el empleo de diferentes interfaces de programación de aplicaciones brindan las herramientas necesarias para lograr un intercambio de datos eficiente y sin pérdidas entre el dispositivo móvil y el brazo robótico.

Contar con una latencia de aproximadamente 6.14 milisegundos para la ejecución del proceso simulado de soldadura y una de aproximadamente 2.24 milisegundos para la simulación del proceso de pick and place demuestran la idoneidad de la forma de comunicación implementada. Esto es un indicador de robustez de la solución adoptada ya que, como se puede apreciar, estos tiempos no afectan a la correcta ejecución de actividades en entornos industriales y académicos.

Finalmente, en la fase de evaluación de usabilidad, el sistema obtuvo una calificación aceptable. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que, al ser un primer prototipo todavía se requieren de mejoras significativas con el objetivo de alcanzar un nivel de flexibilidad, fluidez e intuición que respalde una experiencia de usuario óptima.

RECOMENDACIONES

Como una investigación paralela a este trabajo, se recomienda ahondar en la literatura concerniente al control de brazos robóticos mediante RA. Para esto, se pueden emplear las guías PRISMA con la finalidad de que la información recolectada sea objetiva y carezca de sesgos. Además, realizar un análisis bibliométrico adecuado permitirá identificar a los autores expertos a nivel mundial sobre esta temática, enriqueciendo así el contexto teórico.

A pesar de que los tiempos de respuesta entre el dispositivo móvil y el brazo robótico son notables, para trabajos futuros se plantea usar otros protocolos de comunicación enfocados al internet de las cosas como por ejemplo MQTT o CoAP, así como aumentar la seguridad de la comunicación implementando certificados. Asimismo, se propone incrementar el numero de procesos que el brazo robótico pueda realizar, con la finalidad de que el usuario tenga un abanico más amplio de posibilidades de control.

Finalmente, se propone comparar un entrenamiento convencional sobre el uso y control del UFACTORY Lite 6 con la capacitación presentada en el sistema. De esta manera, se pueden optimizar tiempos y tener otro fundamento para escoger el uso de RA sobre otras metodologías de control y enseñanza. Esta comparativa ayudará a resaltar las ventajas del sistema en términos de conocimiento y eficacia, consolidando su importancia en el entorno industrial.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguas, L. F., Coral, R., Morales, F. D., & Toasa, R. M. (2022). 3D Modeling for virtual tour of a Higher Education Institution. *2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 1–5. <https://doi.org/10.23919/CISTI54924.2022.9820366>
- Alaudeen, K. M., Selvarajan, S., Manoharan, H., & Jhaveri, R. H. (2024). Intelligent robotics harvesting system process for fruits grasping prediction. *Scientific Reports*, *14*(1), 2820. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52743-8>
- Alessio-Mazzola, M., Colombo, P., Barducci, N., Ghezzi, E., Zagra, L., Caldora, P., Ometti, M., Placella, G., & Salini, V. (2024). Direct anterior approach with conventional instruments versus robotic posterolateral approach in elective total hip replacement for primary osteoarthritis: a case–control study. *Journal of Orthopaedics and Traumatology*, *25*(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s10195-024-00753-7>
- Avila, E. A., Chapa, D. P., Arenas, I. D., & Hurtado, C. V. (2022). A Digital Twin implementation for Mobile and collaborative robot scenarios for teaching robotics based on Robot Operating System. *2022 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 559–564. <https://doi.org/10.1109/EDUCON52537.2022.9766583>
- Black, D. G., Andjelic, D., & Salcudean, S. E. (2024). Evaluation of Communication and Human Response Latency for (Human) Teleoperation. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, *6*(1), 53–63. <https://doi.org/10.1109/TMRB.2024.3349612>
- Black, D., Nogami, M., & Salcudean, S. (2024). Mixed reality human teleoperation with device-agnostic remote ultrasound: Communication and user interaction. *Computers & Graphics*, *118*, 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2024.01.003>
- Bonali, F. L., Vitello, F., Kearl, M., Tibaldi, A., Whitworth, M., Antoniou, V., Russo, E., Delage, E., Nomikou, P., Becciani, U., van Wyk de Vries, B., & Krokos, M. (2024). GeaVR: An open-source tools package for geological-structural exploration and data collection using immersive virtual reality. *Applied Computing and Geosciences*, *21*, 100156. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2024.100156>
- Caiza, G., Riofrio-Morales, M., Robalino-Lopez, A., Toscano, O. R., Garcia, M. V., & Naranjo, J. E. (2021). *An Immersive Training Approach for Induction Motor Fault Detection and Troubleshooting* (pp. 499–510). https://doi.org/10.1007/978-3-030-87595-4_36
- de Boer, T. A. B., de Winter, J. C. F., & Eisma, Y. B. (2023). Augmented reality-based telepresence in a robotic manipulation task: An experimental evaluation. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, *5*(4). <https://doi.org/10.1049/cim2.12085>
- Fath, A., Liu, Y., Xia, T., & Huston, D. (2024). MARSBot: A Bristle-Bot Microrobot with Augmented Reality Steering Control for Wireless Structural Health Monitoring. *Micromachines*, *15*(2), 202. <https://doi.org/10.3390/mi15020202>
- Lucía Asencios-Trujillo, Lida Asencios-Trujillo, Carlos LaRosa-Longobardi, Djamila Gallegos-Espinoza, Livia Piñas-Rivera, & Rosa Perez-Siguas. (2024). Virtual Assistance System for Teaching Physics Experiments in University Students. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, *40*(1), 109–117. <https://doi.org/10.37934/araset.40.1.109117>

- Lukas, C. A., Blechert, J., & Berking, M. (2024). A smartphone application to reduce problematic drinking: a feasibility trial. *Pilot and Feasibility Studies*, 10(1), 34. <https://doi.org/10.1186/s40814-023-01420-0>
- Mahmoud, M., Walker, R. J., & Denzinger, J. (2024). API usage templates via structural generalization. *Journal of Systems and Software*, 210, 111974. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2024.111974>
- Naranjo, J. E., Ayala, P., Altamirano, S., Brito, G., & Garcia, M. V. (2018). *Intelligent Oil Field Approach Using Virtual Reality and Mobile Anthropomorphic Robots* (pp. 467–478). https://doi.org/10.1007/978-3-319-95282-6_34
- Naranjo, J. E., Caiza, G., Velastegui, R., Castro, M., Alarcon-Ortiz, A., & Garcia, M. V. (2022). A Scoping Review of Pipeline Maintenance Methodologies Based on Industry 4.0. *Sustainability*, 14(24), 16723. <https://doi.org/10.3390/su142416723>
- Naranjo, J. E., Lozada, E. C., Espín, H. I., Beltran, C., García, C. A., & García, M. V. (2018). Flexible Architecture for Transparency of a Bilateral Tele-Operation System implemented in Mobile Anthropomorphic Robots for the Oil and Gas Industry. *IFAC-PapersOnLine*, 51(8), 239–244. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.383>
- Naranjo, J. E., Sanchez, D. G., Robalino-Lopez, A., Robalino-Lopez, P., Alarcon-Ortiz, A., & Garcia, M. V. (2020). A Scoping Review on Virtual Reality-Based Industrial Training. *Applied Sciences*, 10(22), 8224. <https://doi.org/10.3390/app10228224>
- Naranjo, J.-E., Caiza, G., Gallo-C., V., Alvarez-T., S., Lopez, W.-O., & Garcia, M.-V. (2023). *Immersive Technology-Based Guidance Module for Induction Motor Diagnosing* (pp. 478–493). https://doi.org/10.1007/978-3-031-30592-4_32
- Raj, S., Murthy, L. R. D., Shanmugam, T. A., Kumar, G., Chakrabarti, A., & Biswas, P. (2024). Augmented reality and deep learning based system for assisting assembly process. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 18(1), 119–133. <https://doi.org/10.1007/s12193-023-00428-3>
- Rivera, E. F., Morales, E. E., Florez, C. C., & Toasa, R. M. (2021). *Development of an Augmented Reality System to Support the Teaching-Learning Process in Automotive Mechatronics* (pp. 451–461). https://doi.org/10.1007/978-3-030-87595-4_33
- Shahria, M. T., Arvind, A., Iqbal, I., Saad, M., Ghommam, J., & Rahman, M. H. (2023). Vision-Based Localization and Tracking of Objects Through Robotic Manipulation. *2023 IEEE 14th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PEDS57185.2023.10246715>
- Sokolov, Ya. A., Pugach, A. V., Baykalova, N. A., Gaipov, K. E., Knyazeva, I. O., Patsel, D. E., & Lukevich, D. R. (2024). *Computational analysis of the influence of internet traffic flows in IP networks*. 060015. <https://doi.org/10.1063/5.0191652>
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2024). Virtual manufacturing in Industry 4.0: A review. *Data Science and Management*, 7(1), 47–63. <https://doi.org/10.1016/j.dsm.2023.10.006>
- Sven, A., Nguyen, H. A., Nadi, S., Nguyen, T. N., & Mezini, M. (2019). Investigating Next Steps in Static API-Misuse Detection. *2019 IEEE/ACM 16th International Conference on Mining Software Repositories (MSR)*, 265–275. <https://doi.org/10.1109/MSR.2019.00053>

- Tiwari, A. S., Bhagat, K. K., & Lampropoulos, G. (2024). Designing and evaluating an augmented reality system for an engineering drawing course. *Smart Learning Environments*, 11(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s40561-023-00289-z>
- Toasa, O. R., Semblantes, Y., Martínez, D., Baldeón, P., & Toasa, R. M. (2024). *Virtual Reality in E-commerce: Brief Review of Current State* (pp. 647–655). https://doi.org/10.1007/978-981-99-0333-7_47
- Wanyama, J., Bwambale, E., Kiraga, S., Katimbo, A., Nakawuka, P., Kabenge, I., & Oluk, I. (2024). A systematic review of fourth industrial revolution technologies in smart irrigation: Constraints, opportunities, and future prospects for sub-Saharan Africa. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100412. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100412>
- Wijaya, G. D., Caesarendra, W., Petra, M. I., Królczyk, G., & Glowacz, A. (2024). Comparative study of Gazebo and Unity 3D in performing a virtual pick and place of Universal Robot UR3 for assembly process in manufacturing. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 132, 102895. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.102895>
- Wright, R., Parekh, S., White, R., & Losey, D. P. (2024). Safely and autonomously cutting meat with a collaborative robot arm. *Scientific Reports*, 14(1), 299. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50569-4>
- Wu, D., Chen, S., Wang, M., & Cheng, Z. (2024). *Mobile AR-Based Robot Motion Control from Sparse Finger Joints* (pp. 351–363). https://doi.org/10.1007/978-3-031-50075-6_27

ANEXOS

ANEXO 1

FORMATO DE ENCUESTA SUS

**Sistema de realidad aumentada para el control del brazo robótico
UFACTORY Lite 6**

Gracias por participar en esta encuesta diseñada para evaluar la usabilidad de nuestro sistema mediante el reconocido método System Usability Scale (SUS). Su opinión y experiencia son fundamentales para mejorar la calidad y eficiencia de nuestros productos y servicios. Para la calificación se usa la Escala de Likert, asignando un valor de 1 para "Totalmente en desacuerdo" y un valor de 5 para "Totalmente de acuerdo".

Nombre:

Formación (título académico más alto):

Pregunta	1	2	3	4	5
1. Creo que me gustaría utilizar este sistema con frecuencia.					
2. El sistema me ha parecido innecesariamente complejo.					
3. Creo que el sistema es fácil de usar.					
4. Creo que necesitaría el apoyo de un técnico para poder utilizar este sistema.					
5. Me pareció que las distintas funciones del sistema estaban bien integradas.					
6. Me pareció que había demasiadas incoherencias en este sistema.					
7. Imagino que la mayoría de la gente aprendería a utilizar este sistema muy rápidamente.					
8. El sistema me pareció muy incómodo de usar.					
9. Me sentí muy seguro usando el sistema.					
10. Tuve que aprender muchas cosas antes de empezar a utilizar el sistema.					

Firma

C.C:

ANEXO 2

VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

Para la elección de especialistas, se ha considerado un perfil acorde a los siguientes criterios: formación académica relacionada con el tema investigativo, experiencia académica y/o laboral orientada a la gestión administrativa y motivación para participar. La siguiente tabla presenta información detallada de los actores seleccionados para la validación de esta investigación.

Nombres y Apellidos	Años de experiencia	Titulación Académica	Cargo
Marcelo Vladimir García Sánchez	15	PhD en Ingeniería de Control, Automatización y Robótica, Universidad del País Vasco.	Docente investigador Universidad Técnica de Ambato
Erika Cristina Lozada Martínez	7	Ingeniera en Sistemas computacionales e informáticos	Responsable TIC informática (E) de la cooperativa de ahorro y crédito OSCUS.
Andrea Libertad Alarcón Ortiz	6	Magister en Telecomunicaciones	Docente Instituto Superior Tecnológico Tungurahua.

- Los objetivos perseguidos mediante la validación son los siguientes:
- Validar la metodología de trabajo aplicada en el desarrollo de la investigación
- Aprobar los resultados, conclusiones y recomendaciones obtenidas
- Redefinir (si es necesario) el enfoque de los elementos desarrollados en la propuesta, considerando la experiencia de los especialistas.
- Constatar las posibilidades potenciales de aplicación del sistema propuesto.

Instrumento para validar

Luego de seleccionar a los profesionales que conforman el panel para la validación, se procedió a desarrollar los criterios de evaluación, facilitando el acceso que detalla los parámetros considerados a cada validador. A continuación, se especifican los criterios en mención:

Criterios	Descripción
Impacto	Representa el alcance que tendrá el sistema y su representatividad en la generación de valor público.
Aplicabilidad	La capacidad de implementación del sistema considerando que los contenidos de la propuesta sean aplicables.
Conceptualización	Los componentes de la propuesta tienen como base conceptos y teorías resultados de manera sistémica articulada.
Actualidad	Los contenidos de la propuesta consideran los procedimientos actuales y los cambios científicos y tecnológicos que se producen en la nueva gestión pública.
Calidad Técnica	Miden los atributos cualitativos del contenido de la propuesta.
Factibilidad	Nivel de utilización del modelo propuesto por parte de la Entidad.
Pertinencia	Los contenidos de la propuesta son conducentes, concernientes y convenientes para solucionar el problema planteado.

Una vez puntualizados los criterios utilizados en la validación, se determinó la escala de criterios cualitativos para su evaluación, según el nivel de importancia y representatividad como se muestra a continuación.

Criterios	Evaluación según importancia y representatividad				
	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					
Aplicabilidad					
Conceptualización					
Actualidad					
Calidad Técnica					
Factibilidad					
Pertinencia					

Resultados de la validación

Validador 1

Nombres y Apellidos	Años de experiencia	Titulación Académica	Cargo
Marcelo Vladimir García Sánchez	15	PhD en Ingeniería de Control, Automatización y Robótica, Universidad del País Vasco (EHU).	Docente investigador Universidad Técnica de Ambato

Criterios	Evaluación según importancia y representatividad				
	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad					X
Calidad Técnica					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X



Firma

Validador 2

Nombres y Apellidos	Años de experiencia	Titulación Académica	Cargo
Erika Cristina Lozada Martínez	7	Ingeniera en Sistemas Computacionales e Informáticos	Responsable TIC informática (E) de la cooperativa de ahorro y crédito OSCUS.

Criterios	Evaluación según importancia y representatividad				
	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad					X
Calidad Técnica					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X

ERIKA CRISTINA LOZADA
MARTINEZ
Nombre de reconocimiento C=EC, O=SECURITY DATA S.A. 2,
OU=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE INFORMACION,
SERIALNUMBER=300923094920, CN=ERIKA CRISTINA LOZADA
MARTINEZ
Razon:
Localización:
Fecha: 2024-03-07T21:53:33.536914-05:00

Firma

Validador 3

Nombres y Apellidos	Años de experiencia	Titulación Académica	Cargo
Andrea Libertad Alarcón Ortiz	6	Magister en Telecomunicaciones	Docente Instituto Superior Tecnológico Tungurahua

Criterios	Evaluación según importancia y representatividad				
	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad					X
Calidad Técnica					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X



Firmado electrónicamente por:
ANDREA LIBERTAD
ALARCON ORTIZ

Firma