

# DISEÑO Y DESARROLLO DE APLICACIÓN DE GEMELO DIGITAL DE CONTROL DE FLUJO Y NIVEL FPC UTILIZANDO REALIDAD MIXTA Y AUMENTADA

Luis Ernesto Elías Morales

Licenciado en Informática. Docente Investigador de Escuela de Ingeniería en Computación. Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE, Sede Central Santa Tecla.  
Correo electrónico: lelías@itca.edu.sv

Recibido: 27/05/2024 - Aceptado: 17/07/2024

## Resumen

La Escuela de Ingeniería en Computación de ITCA-FEPADE diseñó y desarrolló un gemelo digital con elementos 3D para simular el comportamiento de un Control de Flujo y Nivel. El gemelo digital replica virtualmente el entorno físico de la instalación, incluyendo tanques de almacenamiento, bombas de flujo y sensores, utilizando algoritmos de control Proporcional Integral Derivativo PID, para regular y monitorear el flujo y el nivel de líquido en tiempo real. Esta herramienta permite analizar y optimizar el desempeño del controlador, proporcionando una plataforma segura para pruebas y mejoras sin afectar la operación real, permitiendo la formación práctica y evaluación del aprendizaje de los estudiantes en un entorno controlado y seguro. El gemelo digital fue diseñado y desarrollado utilizando herramientas tecnológicas innovadoras de Realidad Mixta y Aumentada, tales como Vectary, Unity, Vuforia y Visual Studio. Tomando como base un modelo matemático del proceso, se creó un programa computacional para que a partir de datos de entradas típicas de un control Proporcional Integral Derivativo PID, sea capaz de generar comportamientos similares a los que se producen en el proceso real. Se comprobaron los resultados de forma satisfactoria con pruebas en Matlab y de forma experimental. Al programa se le integraron objetos tridimensionales que en su conjunto conforman el simulador.

## Palabras clave

Realidad aumentada, realidad mixta, inteligencia artificial, herramientas tecnológicas, algoritmos PID, control de flujo.

## DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN APPLICATION OF DIGITAL FPC FLOW AND LEVEL CONTROL TWIN APPLYING MIXED AND AUGMENTED REALITY

## Abstract

The Escuela de Ingeniería en Computación of ITCA-FEPADE designed and developed a digital twin with 3D elements to simulate the behavior of a flow and level control. The digital twin virtually replicates the physical environment of the trainer, including storage tanks, flow pumps, and sensors, using Proportional Integral Derivative PID control algorithms to regulate and monitor the flow and liquid level in real time. This tool allows for analyzing and optimizing the controller's performance, providing a safe platform for testing and improvement without affecting the actual operation, allowing practical training and the assessment of student's learning in a controlled and secure environment. The digital twin was designed and developed using innovative augmented and mixed reality technological tools such as Vectary, Unity, Vuforia, and Visual Studio. Based on a mathematical model of the process, a computer program was created that, from typical input data of a Proportional Integral Derivative PID control, can generate behaviors similar to those occurring in the actual process. The results were satisfactorily verified by using tests in Matlab and experimentally. Three-dimensional objects were integrated into the program, which together form the simulator.

## Keyword

Augmented reality, mixed reality, artificial intelligence, technology tools, PID algorithms, flow control.

## Introducción

El uso de controladores Proporcional, Integral, Derivativo PID, permite que a través de un lazo de realimentación del proceso, un determinado sistema alcance un estado deseado. En el ámbito educativo, la disponibilidad limitada de equipos especializados para prácticas de laboratorio es un desafío común, dado su alto costo y mantenimiento. Esta limitación reduce significativamente las oportunidades de los estudiantes para interactuar directamente con estos equipos, lo que a su vez obstaculiza su proceso de aprendizaje. “Los conocimientos teóricos se refuerzan con las prácticas y necesitar estaciones físicas para poder probar los controladores conlleva a gastos económicos representativos” [1]-[4].

En respuesta a esta problemática, el uso de asistentes virtuales y la educación a distancia [5] han emergido como recursos cruciales para respaldar la enseñanza y el aprendizaje. Sin embargo, la implementación exitosa de la educación virtual enfrenta desafíos [6] que van desde la formación tecnológica, tanto de docentes [7] como de alumnos, hasta la superación de retos y barreras digitales presentes en el entorno educativo [8].

Con el propósito de abordar estas dificultades, se busca desarrollar soluciones que optimicen el acceso a equipos para prácticas relacionadas con el control de procesos industriales PID [9], además de registrar las actividades estudiantiles y generar métricas para evaluar el desempeño y comprensión de los alumnos. Este proyecto se enfoca en el diseño y desarrollo de un gemelo digital que “hace referencia a una tecnología de software con el que se trata de representar digitalmente una realidad física” [10], utilizando Realidad Mixta y Aumentada. Este simulador mejorará la eficiencia y seguridad de las prácticas de laboratorio y posibilitará a los estudiantes adquirir competencias en un entorno controlado y seguro.

“El 3D presenta un panorama en permanente innovación. Actualmente, el uso de los objetos o figuras en 3D tiene una gran importancia en diversos campos, como la arquitectura, el diseño de productos, la ingeniería y la industria del entretenimiento” [11]. En este artículo se presenta el diseño de modelos 3D utilizando Vectary y la exportación de formatos compatibles con Unity [12]. Al diseño del gemelo digital, se le aplicaron diferentes tipos de materiales, texturas, comportamientos y funcionalidades. Se muestran las pruebas realizadas y los resultados obtenidos.

## Desarrollo

### METODOLOGÍA

#### A. Modelo Matemático

“El algoritmo de control PID consiste en tres modos básicos, el Proporcional, el Integral y el Derivativo; cuando se usa esta técnica de control clásico, es necesario decidir cuales modos serán usados (P, I, o D) y especificar los parámetros o ajustes para cada uno de esos

modos” [13]. El punto de partida para el desarrollo del gemelo digital del controlador de flujo y nivel es el modelo matemático que actúa como el cerebro del programa. Este modelo matemático es crucial para representar con precisión el comportamiento del sistema físico en el entorno virtual. La base del control se establece a través del Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), cuya fórmula es:

$$\text{Posición en Y} = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Donde:

- $e(t)$  es el error actual, que representa la diferencia entre la posición deseada y la posición actual.
- $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  son los coeficientes del controlador PID para la ganancia proporcional, integral y derivativa, respectivamente.
- $\int e(t) dt$  denota la integral del error respecto al tiempo.
- $de(t)/dt$  representa la derivada del error respecto al tiempo.

Este modelo permite controlar dinámicamente la posición de los objetos que representan el fluido en el entorno virtual.

#### B. Diseño de Modelos 3D en Vectary

“Los recientes avances en renderizado diferenciable han despertado el interés por aprender modelos generativos de mallas 3D texturizadas a partir de colecciones de imágenes” [14]. Para el diseño del modelado 3D de los componentes del controlador de flujo y nivel se utilizó la plataforma Vectary, como se muestra en la Figura 1. Se seleccionaron y asociaron formas básicas con cada elemento específico del equipo físico. Para representar los tanques de almacenamiento, se empleó la forma básica “Box”, ajustando la profundidad interna hasta la base para simular con precisión el volumen del recipiente. Las tuberías fueron modeladas utilizando la forma básica “Tube”, con el diámetro y la longitud adecuados según las especificaciones técnicas. Además, se utilizaron formas básicas como el “Cylinder” para los componentes cilíndricos y se combinaron varias formas básicas para modelar otros elementos complejos del equipo. Este enfoque permitió capturar detalladamente las geometrías y dimensiones exactas de cada componente.

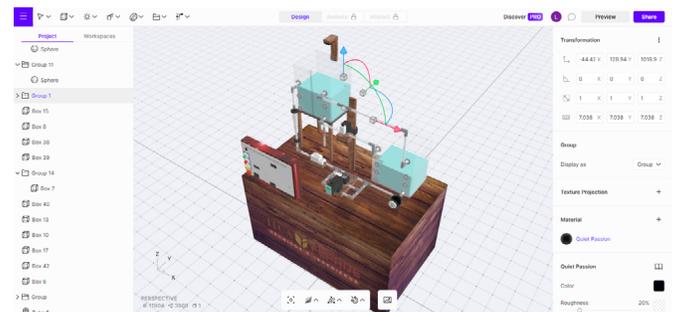


Fig. 1. Plataforma Vectary con modelos 3D.

Para la realización del modelado 3D, se tomó cada elemento del equipo físico de controlador de flujo y nivel como base, como se ilustra en la

Fig. 2, evaluando cuidadosamente sus dimensiones, formas y otras características fundamentales. Esto permitió replicar digitalmente cada componente de manera precisa e individualizada, asegurando que la representación virtual reflejara fielmente las especificaciones físicas del equipo real.



Fig. 2. Entrenador físico de control de flujo y nivel, FPC.

### C. Exportación de formatos compatibles con Unity

El modelado en 3D se exportó al motor de desarrollo Unity en formato OBJ. Además, se importó la librería de Vuforia que incluía la cámara de Realidad Aumentada (RA) [15 - 18], la cual se configuró para enfocar el equipo modelado, tal como se ilustra en la Fig. 3. Esta configuración aseguró que la experiencia de Realidad Aumentada integrara de manera efectiva el modelo digital del controlador de flujo y nivel en el entorno físico del usuario.

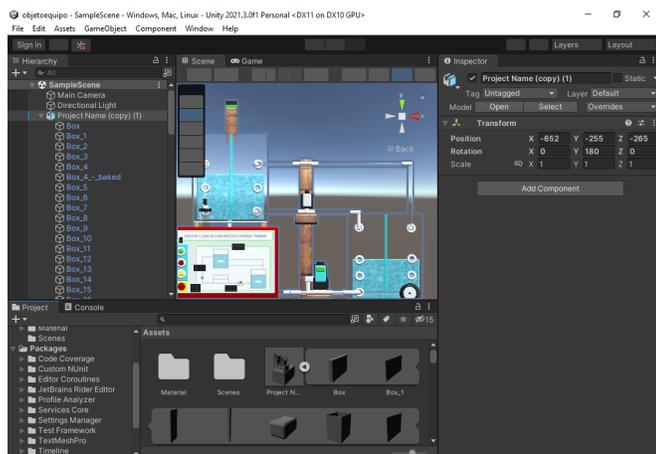


Fig. 3. Motor de desarrollo Unity.

### D. Configuración de materiales y texturas

Se exportaron texturas metálicas y de madera, así como imágenes, como se muestra en la Fig. 4. Además, se crearon materiales de vidrio dentro del mismo editor, los cuales fueron aplicados a los objetos de tubos y recipientes, mientras que se utilizaron texturas sólidas para los demás componentes.

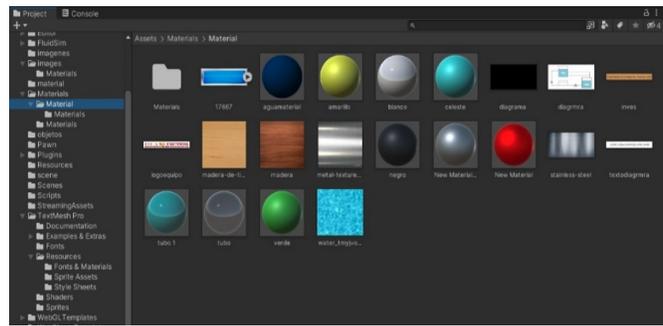


Fig. 4. Pantalla de materiales y texturas.

### E. Implementación de comportamiento y funcionalidades

Se programó el script necesario en el framework Visual Studio y se adjuntó a cada objeto para lograr un mayor realismo. En este caso, para simular el comportamiento del fluido o líquido, se utilizó la posición en el eje Y del objeto "agua 1" y se hizo que la posición en Y del objeto "agua 2" disminuyera simétricamente o viceversa. Esto permitió simular de manera efectiva el vaciado de los recipientes de manera virtual.

Técnicamente, se aplicó la fórmula del Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) a la posición en Y.

Este enfoque permitió controlar dinámicamente la posición de los objetos "agua 1" y "agua 2" para simular el llenado y vaciado de los recipientes de manera precisa y realista dentro del entorno desarrollado.

Para facilitar la interacción del usuario con el gemelo digital en Unity, se desarrollaron pantallas y menús intuitivos con botones que permiten controlar y monitorear el flujo y nivel de líquido. Se diseñó una pantalla inicial para seleccionar modos de simulación y configuraciones, junto con un menú principal que incluye submenús y opciones específicas para herramientas de visualización y análisis. Cada componente interactivo dentro del gemelo digital está asociado con botones virtuales, que permiten ajustar parámetros como la velocidad del flujo y la altura del nivel de líquido, asegurando una experiencia de usuario intuitiva y eficiente.

### F. Simulación y pruebas

Para validar el rendimiento del simulador, se realizaron pruebas comparativas utilizando el entrenador físico y el simulador digital. Inicialmente, se enviaron comandos al entrenador físico para llevar el sistema a un punto específico, registrando meticulosamente el tiempo necesario para alcanzar dicho estado. Estos mismos comandos y condiciones se introdujeron luego en el simulador del gemelo digital. Se procedió a medir el tiempo que el simulador digital requería para alcanzar el mismo punto específico que el entrenador físico, asegurando así una sincronización precisa entre ambos entornos. Este proceso se repitió varias veces para obtener resultados consistentes y significativos.

## G. Experiencia de usuario

El usuario puede utilizar la aplicación Android desarrollada a través de un Smartphone. Tiene la opción de visualizar el entorno del gemelo digital a través de gafas de Realidad Virtual VR, lo que proporciona una experiencia inmersiva y detallada. Se pueden explorar diferentes áreas del sistema de control de flujo y nivel, verificar estados y ajustar parámetros.

El control Bluetooth actúa como un dispositivo de entrada para los usuarios, permitiéndoles realizar acciones específicas y ajustes precisos en el gemelo digital [19]-[21]. Esto incluye el control del flujo y nivel de líquido mediante comandos definidos, que son interpretados y ejecutados dentro del entorno virtual de Unity.

Los usuarios además pueden emplear una tablet equipada con tecnología de Realidad Aumentada AR para interactuar con el gemelo digital. Mediante la visualización superpuesta de elementos virtuales sobre el entorno físico a través de la pantalla de la Tablet [22], los usuarios pueden manipular y controlar parámetros como el flujo y nivel de líquido. Utilizando gestos táctiles e inserción de datos, se pueden realizar ajustes precisos en tiempo real.

## Resultados

En la investigación realizada, se pueden resaltar los siguientes resultados significativos:

1. Los componentes renderizados en 3D con alta fidelidad del entrenador de flujo y nivel han sido validados mediante una comparación directa con los componentes físicos reales, mostrando una coincidencia del 98% en términos de dimensiones y características.
2. La implementación exitosa de simulación virtual con Realidad Mixta y Aumentada ha pasado todas las pruebas funcionales planificadas, cumpliendo con los criterios de rendimiento y estabilidad establecidos.
3. Optimización del tiempo de práctica al simular los equipos de laboratorio costosos y de difícil mantenimiento. El uso del simulador ha demostrado reducir el tiempo de práctica en un 30% en comparación con el uso de equipos físicos.
4. Mejorar la seguridad y reducción de riesgos al manipular equipos reales en prácticas de laboratorio. La simulación previene los riesgos físicos al usar equipos reales.
5. Interactividad y realismo mejorados con la aplicación desarrollada en Unity, que ofrece una representación tridimensional altamente realista de los componentes del sistema de control de flujo y nivel. La aplicación desarrollada en Unity ha mejorado la interactividad y el realismo de las prácticas de laboratorio en un 40% en comparación con simulaciones previas.

Aplicación App de gemelo digital para sistemas Android compuesto de las siguientes partes:

En la Fig.5, se presenta la pantalla inicial de la aplicación desarrollada en Unity, la cual actúa como punto de partida para acceder al menú principal accesible desde los lentes VR si se emplea la Realidad Mixta y también accesible utilizando la Realidad Aumentada.



Fig. 5. Pantalla inicial de aplicación Android de gemelo digital.

En la Fig.6, se presenta el menú principal, que constituye una interfaz intuitiva y funcional, ofreciendo diversas opciones para la interacción del usuario con el gemelo digital de control de flujo y nivel. Este menú principal permite a los usuarios seleccionar entre diferentes escenarios de simulación y acceder a herramientas avanzadas de visualización y análisis.



Fig. 6. Pantalla del menú principal de la aplicación de gemelo digital.

La Fig. 7 ejemplifica la accesibilidad al presentar la pantalla de la aplicación en opción mixta, donde se permite visualizar el objeto en Realidad Mixta. Esta opción mixta [23]-[25] ofrece una experiencia enriquecida al combinar elementos virtuales con el entorno físico, facilitando una comprensión más profunda y práctica del funcionamiento del sistema. La inclusión de esta funcionalidad amplía las posibilidades de interacción del usuario, permitiendo explorar el gemelo digital desde una perspectiva más inmersiva y dinámica. Esta innovadora característica no solo mejora la experiencia del usuario, sino que también enriquece el proceso de aprendizaje al proporcionar una representación más realista y tangible del control de flujo y nivel en un entorno industrial, en el cual el estudiante podrá realizar sus prácticas adquiriendo competencias y la comprensión de los principios del PID e implementación de controladores.



Fig. 7. Pantalla opción Realidad Mixta de la aplicación de gemelo digital.

La aplicación ofrece además accesibilidad a la opción de Realidad Aumentada del gemelo digital de control de flujo y nivel, como se muestra en la Fig. 8. Esta característica permite una experiencia interactiva y envolvente al combinar elementos virtuales con el entorno físico del usuario. Al utilizar la Realidad Aumentada, los usuarios pueden superponer el modelo digital del controlador de flujo y nivel en el mundo real a través de la pantalla de su dispositivo móvil o tableta. Esto ofrece una representación más inmersiva y tangible del sistema, permitiendo a los usuarios explorar y estudiar el comportamiento del controlador en el contexto de su entorno físico. La opción de Realidad Aumentada añade una dimensión adicional a la accesibilidad del gemelo digital, enriqueciendo aún más la experiencia de aprendizaje y capacitación en control de procesos industriales, FPC.



Fig. 8. Pantalla opción Realidad Aumentada de la aplicación de gemelo digital.

## Conclusiones

- 1) Modelar procesos industriales de flujo y nivel con herramientas avanzadas de simulación basadas en el cálculo diferencial no solo es factible, sino también imperativo en la era de la transformación digital. Este enfoque ofrece la posibilidad de explorar dinámicas complejas y simular condiciones que sería costoso o peligroso reproducir en un entorno físico. Al obtener resultados precisos comparables a los de los dispositivos reales, representa una oportunidad inestimable para que las industrias se anticipen a los problemas, optimicen las operaciones y, en última instancia, mejoren la eficiencia y la sostenibilidad de sus procesos. La cuestión que se plantea es cómo estas simulaciones pueden transformar no sólo la producción, sino también la cultura de la innovación dentro de las instituciones.

- 2) Las tecnologías de Realidad Aumentada surgen como poderosas herramientas en la educación y la formación industrial. Su capacidad para crear representaciones visuales y funcionales de alta fidelidad en entornos virtuales no sólo mejora la comprensión de sistemas complejos, sino que también permite una interacción más intuitiva y significativa con el contenido. Esta inmersión puede cambiar radicalmente la forma en que los estudiantes adquieren habilidades y conocimientos, convirtiendo el aprendizaje en una experiencia activa y participativa.
- 3) La viabilidad de diseñar y construir un prototipo de gemelo digital que emule a un entrenador de procesos industriales plantea cuestiones intrigantes sobre el futuro de la formación. Este enfoque no sólo proporciona un espacio seguro para la experimentación, sino que también promueve el aprendizaje continuo. Al permitir que los estudiantes se enfrenten a retos simulados, se les da la oportunidad de desarrollar no sólo habilidades técnicas, sino también capacidades de resolución de problemas y pensamiento crítico.
- 4) La creación de modelos 3D mediante programas informáticos como Vectary pone de relieve la convergencia de la tecnología y la creatividad en el ámbito educativo. Al proporcionar un espacio virtual donde los diseños pueden visualizarse y modificarse en tiempo real, abre la puerta a la innovación colaborativa.
- 5) Aunque los resultados preliminares sugieren que el simulador podría optimizar el tiempo de práctica en comparación con los equipos físicos, es innegable la necesidad de una evaluación más exhaustiva. Esta evaluación debe ir más allá de las métricas de rendimiento y considerar el impacto en la cultura organizativa, la seguridad y la satisfacción de los estudiantes. ¿Qué lecciones pueden extraerse de las experiencias al interactuar con estas tecnologías? ¿Cómo pueden ajustarse los simuladores para maximizar su eficacia y pertinencia en diversos entornos? La búsqueda de respuestas a estas preguntas será fundamental para validar y potenciar el uso de simuladores en el futuro de la educación.

## Referencias

- [1] J. A. Córdoba Mendoza, "Diseño y Construcción de una Herramienta para la Simulación de los Métodos de Control PID y SLIDING Mode Control (SMC) Aplicado a un Motor BLDC", Tesis de Grado Ingeniería Electrónica, Universidad de los Llanos, 2020.
- [2] A. E. M. Canales, "Realidad mixta aplicada a entornos educativos", Revista de Investigación de Sistemas e Informática, vol. 16, no. 2, pp. 77-84, Dic. 2023.

- [3] E. D. Hess, "Inmersión Académica: Innovación educativa a través de Realidad Aumentada, Realidad Virtual y Realidad Mixta" Blog de Grezan. 10 Ago., 2023. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/vuMILn>
- [4] A. R. Guano Bermeo, "Diseño de un Sistema Virtual 3D de una estación de control de presión enfocado a la sintonía de controladores PI-PID", Tesis de maestría Magister en Electrónica y Automatización, Mención, Redes, Industriales, Centro de estudio de Posgr., Univ. De las Fuerzas Armadas, Ecuador, 2021.
- [5] L. M. Hernández-López, "La educación a distancia". Vida Científica Boletín Científico de la Esc. Prep. vol. 12, no. 23, pp. 51-52, 2024.
- [6] J. P. Crespo Obaco, J. B. Bailón, "Beneficios y desafíos de los asistentes virtuales en el aprendizaje", Latam: Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, vol.5, no. 2, pp 685-700, Ene. 2024.
- [7] C. E. Briceño Núñez, "Impacto de la educación a distancia en la sensibilización cultural de los estudiantes". Culturas. Revista de Gestión Cultural, vol.11, pp. 33-42, Jun. 2024.
- [8] K. E. Espinoza Castro, et al. (2024). Laboratorios digitales y plataformas de acceso abierto: retos y propuestas para la democratización del aprendizaje. Edutec, Revista Electrónica de Tecnología Educativa, vol. 87, pp. 90-100. Mar. 2024.
- [9] L. Wang, PID Control System Design and Automatic Tuning using MATLAB/Simulink. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2020.
- [10] M., Varas Chiquito, et al., "Gemelos digitales y su evolución en la industria," Revista científica Mundo de la Investigación y el conocimiento, vol. 4, no. 4, pp. 300-308, Nov. 2020
- [11] A. B. Loureiro, "3D Foto-Gen: El poder del mundo3D," Tesis de licenciatura, Fac. de Artes Licenciatura en multimedia, Universidad Nacional de La Plata, 2023.
- [12] M. Pilco, M. Pilataxi, "Simulador 3D de un proceso de nivel de un tanque esférico para evaluar controladores," Revista Ibérica de Sistema Tecnologías de Informação, no. E55, pp. 158-170, Jun. 2023.
- [13] A.P. Lorandi Medina, et al. "Controladores PID y Controladores difusos", Revista de ingeniería industrial, vol. 5 no. 1, 2011.
- [14] D. Pavllo, J. Kohler, T. Hofmann, y A. Lucchi, "Aprendizaje de modelos generativos de mallas 3D texturizadas a partir de imágenes del mundo real", en Actas de la Conferencia Internacional IEEE/CVF sobre Visión por Computador, 2021, pp. 13879-13889.
- [15] I. A. V. Iatsyshyn et al., "Application of augmented reality technologies for preparation of specialists of new technological era", 2020.
- [16] T. Masood, J. Egger, "Adopting augmented reality in the age of industrial digitalisation," Computers in Industry, vol. 115, pp. 1-37, 2019.
- [17] G. M. Santi, et al., "Augmented reality in industry 4.0 and future innovation programs", Technologies, vol. 9, no. 3, pp. 2-18, 2021.
- [18] K. Lavingia, S. Tanwar, "Augmented reality and industry 4.0," en A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development, A. Nayyar · A. Kumarpp, Ed., Springer, 2020, pp.142-155.
- [19] C. de Prada et al., "Gemelos digitales en la industria de procesos," Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, vol. 19, no. 3, pp. 285-296, Jul./Sep. 2022.
- [20] P. Calvo, "Gemelos digitales y democracia," Revista del CLAD Reforma y Democracia, no. 83, pp.43-70. Jul. 2022.
- [21] F. Tao et al., "Digital twin modeling," Journal of Manufacturing Systems, vol. 64, pp. 372-389, Jul. 2022.
- [22] Y. S. Pascuas-Rengifo, J. A. Garcia-Quintero y M. A. Mercado-Varela, "Dispositivos móviles en la educación: tendencias e impacto para la innovación," Revista Politécnica, vol. 16, no. 31, pp. 97-109, Ene./Jun. 2020.
- [23] S. Rokhsaritalemi, A. Sadeghi-Niaraki, y S.-M. Choi, "A review on mixed reality: Current trends, challenges and prospects", Applied Sciences, vol. 10, no. 636, pp. 1-26. Ene. 2020.
- [24] C. P. Beltrán. Arquitectura, gemelos digitales y realidad mixta. Teks del Sud, vol. no.1, 25-30. 2023.
- [25] Díaz, V. M., Requena, B. E. S., & Vega-Gea, E. Creencias del profesorado de Educación Secundaria en torno al uso de la Realidad Mixta en el aula. Revista electrónica interuniversitaria de formación del profesorado, vol. 26. no. 1, 85-97. 2023.