

Gemelos digitales en realidad aumentada para el despiece didáctico de una cortadora de carne

Jenifer Estefania Mercado Velazquez; Héctor Alonso Guerrero Osuna; Arturo Serrano Muñoz; Luis Octavio Solís Sánchez y Ma. del Rosario Martínez Blanco

RESUMEN

La enseñanza y el mantenimiento tradicional de la maquinaria industrial están basados en manuales, lo que dificulta el desarrollo de habilidades prácticas y la comprensión de componentes internos. Esto tiene como consecuencia el aumento de incidentes operativos, desgaste físico de la maquinaria y cortes por mal manejo. El objetivo principal de este proyecto consiste en diseñar un gemelo digital de una rebanadora de carne con realidad aumentada para facilitar el aprendizaje. Primero, se diseñó un modelo tridimensional de la rebanadora de carne con Blender® basado en la máquina física; luego, se importó a Unity®, un motor de realidad aumentada multiplataforma y compatible con Vuforia®, una plataforma de RA especializada que permite reconocer imágenes, objetos y espacios reales para superponer contenido digital. Se creó un objetivo de imagen para la geolocalización del modelo 3D en el entorno físico. El resultado fue una aplicación que permite a los usuarios manipular y visualizar la rebanadora, así como sus componentes y nombres, en realidad aumentada, simulando el proceso de despiece de forma segura e interactiva. Se espera que esta herramienta facilite el proceso de aprendizaje de los ingenieros especializados en maquinaria industrial, en comparación con los métodos tradicionales, reduciendo la brecha entre la teoría y la práctica, a la vez que minimiza los riesgos operativos. Este enfoque demuestra el potencial que existe entre los gemelos digitales y la realidad aumentada, proporcionando un recurso didáctico moderno para la formación técnica segura de los estudiantes.

Palabras clave: realidad aumentada, gemelos digitales, cortadora de carne, despiece, aprendizaje.

Cómo citar: Mercado, J., Guerrero, H., Serrano, A., Solís, L., Martínez, M. (2026). Gemelos digitales en realidad aumentada para el despliegue didáctico de una cortadora de carne. En Peña Guzmán, C. *Mujeres y su impacto en la ciencia y tecnología latinoamericana*. High Rate Consulting. <https://doi.org/10.38202/mujeresimpacto4>

Augmented reality digital twins for the didactic disassembly of a meat cutter

ABSTRACT

Traditional teaching and maintenance of industrial machinery are based on manuals, which makes the development of practical skills and the understanding of internal components difficult. This results in an increase in operational incidents, physical wear of the machinery, and cuts due to improper handling. The main objective of this project is to design a digital twin of a meat slicer with augmented reality to facilitate learning. First, a three-dimensional model of the meat slicer was designed with Blender® based on the physical machine; then, it was imported into Unity®, a cross-platform augmented reality engine compatible with Vuforia®, a specialized AR platform that allows the recognition of images, objects, and real spaces to overlay digital content. An image target was created for the geolocation of the 3D model in the physical environment. The result was an application that allows users to manipulate and visualize the slicer, as well as its components and names, in augmented reality, simulating the disassembly process in a safe and interactive way. It is expected that this tool will facilitate the learning process of engineers specialized in industrial machinery, compared to traditional methods, reducing the gap between theory and practice, while minimizing operational risks. This approach demonstrates the potential that exists between digital twins and augmented reality, providing a modern didactic resource for the safe technical training of students.

Keywords: augmented reality, digital twins, meat slicer, disassembly, learning

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la formación de estudiantes en áreas industriales exige más que la transmisión de conocimientos teóricos, por lo que resulta fundamental que los estudiantes adquieran una comprensión profunda de las máquinas, lo que implica la interacción directa y el conocimiento de sus componentes internos. Los métodos tradicionales, basados en la limitada interacción física con equipos reales y el aprendizaje basado en manuales y planos, provocan una brecha significativa entre la teoría y la práctica, lo que repercute en el desarrollo de competencias operativas, promoviendo deficiencias en procesos de mantenimiento (Fernandes et al., 2014).

Como consecuencia, el sistema educativo ha incorporado herramientas tecnológicas que acercan a los estudiantes a entornos de aprendizaje más dinámicos e inmersivos, facilitando el desarrollo de habilidades prácticas relevantes para el sector industrial. Una de estas es la realidad aumentada (RA), que emerge con un mayor potencial para cerrar esta brecha, definida como la combinación de información digital y física en tiempo real, promoviendo la capacidad de ampliar significativamente la percepción humana (Al-Ansi et al., 2023).

La RA es diferente a la realidad virtual (RV), la cual crea un entorno completamente nuevo y envolvente, al enfocarse en enriquecer la interacción del usuario con su ambiente real mediante la superposición de información virtual en el espacio físico (Mendoza-Ramírez et al., 2023). Además,

la integración de los gemelos digitales, que son réplicas virtuales de objetos y procesos, permite una interacción con máquinas industriales sin necesidad de tenerlas físicamente (Saracco, 2019; Yao et al., 2023). Estos pueden ser utilizados para el monitoreo en tiempo real, la simulación y la optimización (Saracco, 2019; Yao et al., 2023), lo que permite la operación remota y el mantenimiento (Van Dinter et al., 2022). Es importante para la Industria 4.0 y la manufactura inteligente, resaltando la importancia de la digitalización y la autonomía en los sistemas industriales (Qi & Tao, 2018; Rosen et al., 2015; Jiang et al., 2021). Esta tecnología también se utiliza para mejorar los procesos de mantenimiento, brindando beneficios y nuevas oportunidades en diversos casos de uso (Bustamante-Limones et al., 2024).

Esta combinación no solo mejora la productividad, al crear entornos de capacitación más seguros y confiables, sino que elimina los riesgos asociados con la manipulación física y el desgaste operativo (Zafar et al., 2024; Van Dinter et al., 2022).

Al crear entornos inteligentes y seguros para el aprendizaje, se facilita una visualización detallada de los componentes internos y externos de las máquinas, fomentando una manufactura centrada en el ser humano e integrando tecnologías (Zafar et al., 2024). Su implementación en el ámbito educativo, en las áreas industriales y tecnológicas, produce un cambio significativo en los procesos de enseñanza, mejorando las experiencias de aprendizaje, gracias a

la implementación de laboratorios digitales en la educación vocacional. La superposición de modelos 3D detallados o datos en tiempo real sobre un objeto físico o su entorno permite a los estudiantes interactuar con el contenido de forma que replica condiciones del mundo real, pero sin los riesgos o costos asociados (Abad-Segura et al., 2020; Mendoza-Ramírez et al., 2023). Guiando a los estudiantes a través de un procedimiento de ensamblaje o despiece, mostrando las herramientas correctas, el orden de los pasos y la ubicación de los componentes, contribuyendo a abordar varios desafíos en la educación industrial (Koumpourous, 2024). El uso de dispositivos móviles (celulares, tabletas) y el creciente acceso a internet en las aulas logran que sea posible el desarrollo de plataformas accesibles. Ello hace que esta tecnología sea cada vez más viable y atractiva para fines educativos (Chen y Wang, 2015).

El presente trabajo se enfoca en el despiece de una cortadora de carne industrial, un equipo específico diseñado y fabricado por Francisco Said Xamanek en el Laboratorio de Inteligencia Artificial Avanzada (LIAA) de la Universidad Autónoma de Zacatecas (Xamanek Rocha Gómez, 2024). La elección de este equipo no se debe únicamente a su complejidad y la necesidad de una capacitación precisa para su mantenimiento y seguridad, sino también al propósito principal de implementar un mecanismo de automatización y control, económico y funcional, volviéndolo adaptable a equipos comerciales (Xamanek Rocha Gómez, 2024).

Incorporar tecnologías como la realidad aumentada al gemelo digital de esta máquina desarrolla una herramienta educativa que no solo mejora la seguridad operativa y la comprensión técnica, también ofrece una alternativa a los métodos tradicionales de formación en el sector industrial. Es de suma relevancia para la capacitación específica de este equipo; al mismo tiempo, genera impacto en futuras aplicaciones para diversas máquinas industriales.

En este sentido, la implementación de este estudio no solo aborda las limitaciones de los métodos de enseñanza tradicionales, sino que también establece un precedente para la formación de las próximas generaciones de ingenieros y técnicos en entornos industriales. Elegir tecnologías que fomenten un aprendizaje interactivo prepara a los estudiantes para enfrentar los retos de la Industria 5.0 (Asad et al., 2023; Zafar et al., 2024). Este enfoque proporciona una solución para la formación en el despiece de maquinaria específica y transforma la manera en que se adquieren las competencias técnicas en el sector industrial.

Objetivo:

El propósito de este proyecto es desarrollar un gemelo digital interactivo en una aplicación de realidad aumentada, para simular de forma detallada el proceso de despiece y facilitar el análisis de los componentes internos de una cortadora de carne industrial. Ello así, para reducir el riesgo operativo y fortalecer los procesos de enseñanza-aprendizaje.

METODOLOGÍA

En este proyecto se diseñó una herramienta didáctica que fusiona la realidad aumentada (RA) con gemelos digitales (GD) de una cortadora de carne industrial, buscando facilitar el proceso de aprendizaje del despiece y su análisis, con un enfoque especial en la seguridad del aprendiz, que fortalece el proceso con el desarrollo de la aplicación móvil y la validación de características funcionales.

Ello dio comienzo con el proceso de modelado, el que no solo se basó en la recreación de la máquina física, sino que también se buscó que los componentes diseñados fueran precisos. Para tal objetivo, se analizó la ficha técnica de la cortadora de carne para entender su composición y componentes; este documento proporcionó la información sobre las dimensiones reales de las piezas, así como de los materiales de fabricación de cada una de estas.

Posteriormente, se desensambló la cortadora con el objetivo de visualizar los componentes internos y así ubicar detalladamente cada una de las partes; esto fue de utilidad para el modelado 3D. Asimismo, se hizo un estudio de movimiento para la animación en RA de la aplicación. Con todo el proceso de mediciones y la ficha técnica como referencia, se inició el modelado en Blender®; cada componente fue diseñado individualmente, pieza por pieza, para garantizar que el modelo final no solo fuera visualmente exacto, sino que también permitiera la simulación del proceso de despiece de manera precisa, tal como lo haría la máquina real, además de agregar una simulación de movimiento basada en el funcionamiento de la cortadora real.

Dicha fase inicial se centró en crear un modelo tridimensional (3D) de alta fidelidad de la cortadora de carne industrial. El proceso se llevó a cabo sobre la máquina física utilizando el software de modelado 3D Blender®, implementado por su capacidad para crear modelos 3D de alta calidad con un gran nivel de detalle, siendo la herramienta más compatible para el desarrollo de RA. Cada parte de la cortadora fue modelada individualmente, desde su estructura principal hasta los detalles (tornillos y mecanismos internos), asegurando que las dimensiones y propiedades sean precisas para garantizar la fidelidad del gemelo digital; de la misma forma, facilitar la transferencia de habilidades operativas del entorno virtual al físico.

La cortadora es un prototipo de dispositivo automatizado diseñado para cortar carne de res en procesos de deshidratación que utilizan inducción electromagnética y bajas presiones para garantizar una alta calidad proteica para consumo humano. Para el desarrollo del entorno de RA se realizó el modelado de la cortadora de carne y sus componentes en 3D. Se eligió Blender® como software debido a su compatibilidad con Unity® (motor de desarrollo de juegos) y la plataforma de desarrollo de RA (PTC, 2024). La implementación de estas herramientas es importante para el realismo del objeto 3D, como se muestra en la Figura 1.

Para asegurar el rendimiento de la aplicación, se sometió a diferentes cambios con la finalidad de mejorar la cali-

dad visual y el rendimiento, utilizando el flujo de trabajo de renderizado basado en la física (PBR) de Unity®. El uso de PBR fue fundamental para lograr el efecto de materiales como el acero inoxidable de la cuchilla, metales pulidos y el plástico, utilizando diferentes mapas de texturas para definir las propiedades en la superficie del modelo, como el mapa albedo (color base), que define el color de la superficie del modelo sin incluir información sobre iluminación o sombras. En la aplicación se utilizó para diferenciar los materiales base de la cortadora, como la pintura roja del cuerpo, además de representar la textura del acero pulido.

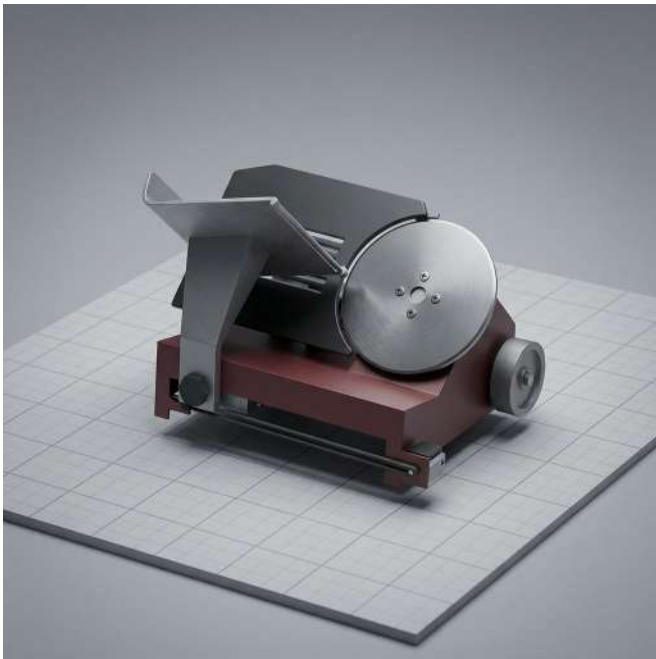


Figura 1. Modelo 3D de la cortadora diseñado en Blender®.

Otro de los mapas que se utilizó es el mapa metálico (Metallic Map), el cual determina si una superficie es metálica o no metálica. Los píxeles blancos en este mapa indican un material metálico (como el acero inoxidable de la cuchilla), mientras que los píxeles negros indican un material no metálico (como el plástico o la goma). Su función principal es que el renderizado calcule cómo debe reaccionar el material a la luz, generando reflejos y brillos realistas. Mientras que el mapa de suavidad (Smoothness Map o Roughness Map) controla qué tan pulida o áspera es una superficie: sus valores altos (píxeles blancos) representan superficies muy pulidas y reflectantes (como la cuchilla de la cortadora), mientras que los valores bajos (píxeles negros) representan superficies ásperas y mate (plásticos y la goma). La correcta combinación de estos mapas permitió alcanzar un realismo visual, haciendo que el modelo 3D se integrara en el entorno de realidad aumentada del usuario.

Luego, se importó el modelo a Unity®, donde, utilizando su SDK para la función de realidad aumentada que integra

Vuforia®, se configuró la cámara AR (cámara de realidad aumentada) para el rastreo en entorno real, detectando un objetivo específico (código QR) y así superponer el modelo 3D en relación con el objetivo de RA (Figura 2).

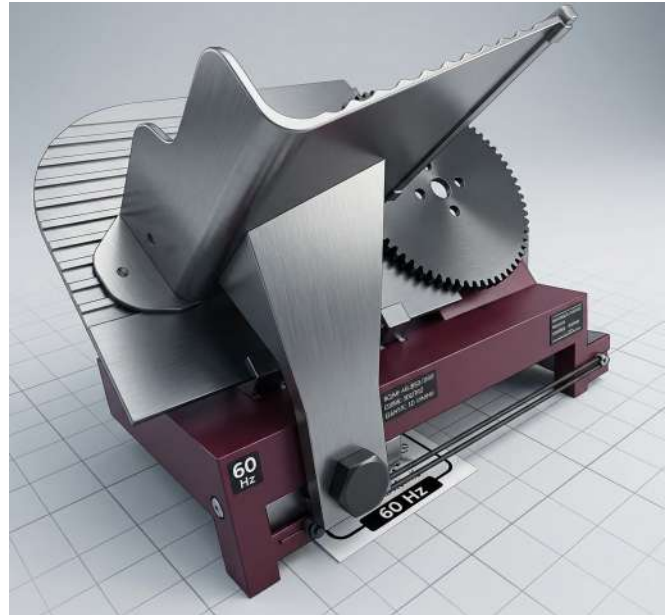


Figura 2. Cortadora de carne exportada en Unity® sobre el Image Target

Con una imagen de un render de la cortadora de carne, se diseñó un código QR como Imagen Objetivo; fue colocado en un lugar visible para realizar las pruebas, como en una mesa de trabajo o un dispositivo móvil. Al enfocar la cámara del dispositivo en la Imagen Objetivo, la aplicación reconoce la imagen y superpone el modelo 3D de la cortadora de carne en el espacio real. El usuario puede interactuar con el modelo, permitiendo la exploración, simulación del despiece e información de cada uno de los componentes con señales de texto.

Utilizar la Imagen Objetivo permite la geolocalización del modelo 3D en realidad aumentada, lo cual brinda un punto de referencia estable, haciendo que el objeto no se mueva o desplace durante la interacción; esto permite usarla en diferentes contextos y lugares de aprendizaje. Este componente es fundamental al interactuar con el gemelo digital, garantizando un punto fijo para la superposición del modelo sobre el entorno físico. Después de que el modelo se importó a Unity® y se configuró el sistema de realidad aumentada con Vuforia®, se diseñó un menú simple e intuitivo, el que funciona como un control remoto para el modelo 3D; de esta manera, el usuario puede manipular el modelo. El objetivo es que el usuario pueda ver las diferentes partes de la cortadora de carne, separarlas y acceder a información detallada de cada una sin complicaciones.

Se desarrolló el menú con la herramienta canvas de Unity® y la UI del mismo entorno; el canvas funciona como un lienzo invisible que se superpone a la pantalla. En este

lienzo se pueden colocar todos los elementos de la interfaz de usuario (UI), como botones, texto e imágenes. Para asegurar su correcto funcionamiento en diferentes dispositivos móviles, se configuró el canvas para que se ajustara automáticamente al tamaño de la pantalla. Dentro del canvas se crearon paneles; estos paneles actuaron como contenedores para agrupar diferentes elementos. Se hizo un panel para el menú principal y otros para los submenús que se activan posteriormente; los botones cumplen con una función específica (ocultar objetos).

Este código vincula la acción de presionar un botón con una respuesta específica; por ejemplo, al tocar el botón de “Despiece”, el código le indica al modelo 3D que activará la animación de separación de las partes. De manera similar, el botón de “Información” activa la visualización de un cuadro de texto junto a la pieza seleccionada por el usuario.

A su vez, se enlazó el menú al objeto 3D al ser parte de la aplicación, el que estará siempre disponible para el usuario. De este modo, una vez que la aplicación detecta la imagen del código QR y superpone el modelo 3D, el menú aparece en la pantalla, permitiendo al usuario manipular el modelo 3D sin que este se moviera o se perdiera de su ubicación inicial.

En la etapa final del proyecto, el desarrollo de la interactividad fue importante. Después de crear los modelos y de optimizarlos para el entorno de realidad aumentada (RA), se realizó la programación de las funciones que permiten la interacción con la réplica virtual, logrando que la aplicación sea fluida e intuitiva con el usuario. Para lograr esto, se crearon varios scripts en C#, el lenguaje de programación utilizado en el motor Unity®, además de cumplir con las características necesarias para el desarrollo del proyecto por tener un bajo consumo de memoria y un buen rendimiento de hardware, haciendo de esta una aplicación ideal para el desarrollo de motores gráficos, lo que permite dar el enfoque en la experiencia del usuario con la creación de funcionalidades y herramientas didácticas; esta decisión optimiza el tiempo y ofrece un producto final estable.

El enlace del código con los elementos visuales en Unity® se llevó a cabo mediante el concepto de Componentes. Cada objeto dentro de la escena virtual, como el modelo de la cortadora de carne, los controles deslizantes o los botones, se considera un GameObject; para que pudiera tener una funcionalidad, se le adjunta un script de C# como componente, para que así el archivo de código se convierta en una parte del objeto, permitiendo de esta forma acceder y manipular sus propiedades. Para esto se desarrollaron dos scripts principales para gestionar las interacciones del usuario: DespieceRotacion y OcultarObjeto. Estos scripts son la base de la interactividad de la aplicación; el script de DespieceRotacion controla la interactividad del usuario con el modelo 3D. En este se programaron interacciones táctiles y animaciones que simulan el proceso de despiece, además del movimiento de cada pieza con el menú dentro del entorno de RA a través de controles deslizantes, permitiendo la rotación y el despiece de la réplica virtual.

Se crearon también dos funciones, ActualizarRotacion y ActualizarDespiece, las cuales están encargadas de rotar el modelo 3D y animar el movimiento de las piezas, cambiándolas de posición. La función ActualizarRotacion manipula los valores del control deslizante que gira el objeto en el eje Y, permitiendo la visualización de 360 grados; a su vez, la función ActualizarDespiece es la encargada de animar el movimiento de las piezas al modificar sus posiciones de manera fluida desde su estado inicial hasta su posición final, aportando realismo con un retraso entre cada pieza y un efecto de aceleración que simula movimiento natural, mostrado en la Figura 3.

El script DespieceRotacion fue diseñado con una clase (GrupoDePiezas) que permite agrupar y gestionar las piezas de forma organizada, como se muestra en la Figura 4. Por su parte, el script OcultarObjeto, mostrado en la Figura 5, completa la funcionalidad del menú gestionando la visibilidad de los componentes, permitiendo a los usuarios seleccionar las piezas de manera individual. Dentro de este se encuentra la función ActualizarDespiece, vinculada a los botones del menú, desactivando la visibilidad de las piezas y activando únicamente la que corresponde al botón seleccionado, facilitando una exploración detallada de cada parte del modelo.

Finalmente, se generó un archivo APK (Paquete de Aplicación de Android®), el formato utilizado para distribuir e instalar aplicaciones en dispositivos móviles con sistema operativo Android®. La creación de este APK permite transferir la aplicación del entorno de desarrollo de Unity® a un formato accesible para los usuarios de forma autónoma.

```
void Start()
{
    // Posiciones originales
    posicionesOriginales = new Vector3[grupos.Length][];
    for (int i = 0; < grupos.Length; i++)
    {
        posicionesOriginales[i] = new Vector3[grupos[i].piezas.Length];
        for (int j = 0; j < grupos[i].piezas.Length; j++)
        {
            posicionesOriginales[i][j] = grupos[i].piezas[j].localPosition;
        }
    }

    // Funciones deslizantes
    if (sliderRotacion != null)
    {
        sliderRotacion.onValueChanged.AddListener(ActualizarRotacion);
    }

    if (sliderDespiece != null)
    {
        sliderDespiece.onValueChanged.AddListener(ActualizarDespiece);
    }
}
```

Figura 3. Script DespieceRotacion

de modelado donde cada componente, desde la base hasta los tornillos, fue creado con precisión, asegurando que los usuarios tengan una representación realista del proceso de despiece y movimiento.

Las Figuras 7 y 8 muestra una representación del entorno de la herramienta de RA diseñada. La misma brinda una experiencia efectiva en el proceso de enseñanza-aprendizaje, algo fundamental para la formación de personal operativo, dado que esto impacta de modo directo en la transferencia de habilidades del entorno virtual al físico.



Figura 7. Aplicación en realidad aumentada de la cortadora de carne

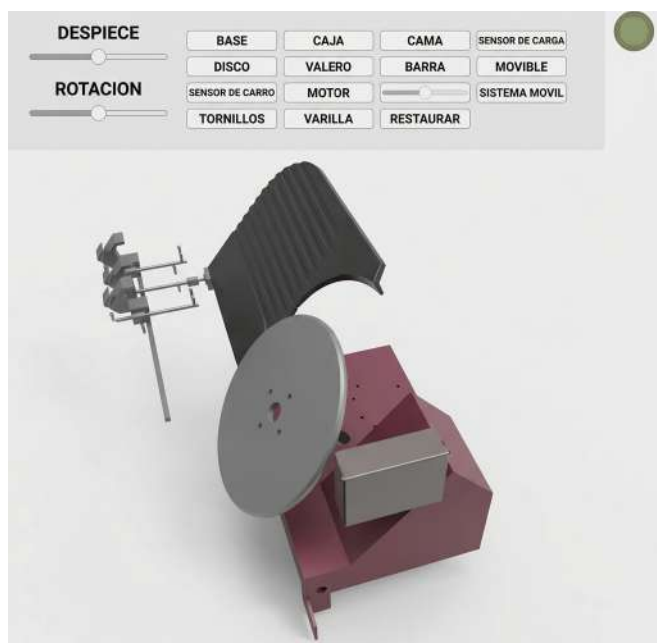


Figura 8. Simulación de despiece en realidad aumentada de la cortadora de carne

Una de las características destacadas es la vista explosionada, puesto que permite visualizar los componentes que, de manera tradicional, sería necesario desmontar de la máquina pieza por pieza, proceso que no solo lleva mucho tiempo, sino que, especialmente con maquinaria compleja como una cortadora, también puede ser riesgoso al manejar partes afiladas o causar daños irreversibles al equipo.

Con el diseño, desarrollo e implementación de un entorno virtual con realidad aumentada de la máquina cortadora de carne, que incluye la separación de componentes de forma organizada y etiquetada, se permite ver piezas que normalmente están ocultas dentro del ensamblaje (tanto de forma física como digital).

La realidad aumentada facilita la interacción con objetos que no están físicamente presentes, evitando el traslado de máquinas pesadas que dificulta la capacitación práctica en diversas ubicaciones. Por lo tanto, la aplicación de RA elimina la necesidad de mover físicamente equipos, haciendo que la capacitación pueda realizarse en cualquier lugar, siempre que se tenga acceso a la aplicación de RA.

CONCLUSIONES

La aplicación fortalece la capacitación técnica, reduce tiempo, costos y accidentes de entrenamiento; por otra parte, también elimina riesgos operativos asociados con el desmontaje físico de la maquinaria. El gemelo digital en realidad aumentada sirve como una alternativa viable en comparación con los métodos de capacitación tradicionales en campos técnicos, ofreciendo una forma segura y eficiente para que los estudiantes y/o operadores adquieran habilidades y conocimientos esenciales para trabajar con maquinaria compleja.

El mejoramiento de la comprensión, así como permitir la visualización de componentes con vista ampliada dentro de la cortadora de carne, proporciona un entorno de capacitación más seguro al eliminar la necesidad de que los usuarios interactúen físicamente con componentes peligrosos como cuchillas de corte, lo que previene el riesgo de laceraciones o percances mayores, como lesiones por aplastamiento, distensiones o esguinces que pueden ocurrir por manejo inadecuado de maquinaria peligrosa. Lo anterior es frecuentemente causado por falta de familiaridad con los componentes y su funcionalidad.

Por lo tanto, interactuar con objetos virtuales en un entorno de realidad aumentada fomenta la participación y proporciona a los usuarios nuevas tecnologías para facilitar y ampliar sus conocimientos. La implementación de esta herramienta interactiva no solo minimiza los riesgos de seguridad, sino que también permite abordar las limitaciones inherentes a la capacitación tradicional, como el uso exclusivo de manuales impresos o la manipulación de maquinaria física que puede ser costosa y logísticamente complicada, mientras que el gemelo digital, al estar empaquetado en un archivo APK, puede ser utilizado en cualquier lugar con un dispositivo móvil, eliminando la necesidad de

trasladar y/o adquirir equipos peligrosos, permitiendo una optimización de tiempo y recursos.

Al fomentar una experiencia de aprendizaje activo, a diferencia de la lectura de un manual tradicional, la manipulación del modelo 3D genera participación directa que mejora la retención del conocimiento. La aplicación no solo muestra los componentes, también simula el proceso de desensamblaje, permitiendo a los estudiantes practicar procedimientos de forma segura, a su propio ritmo y en cualquier lugar. Este método de enseñanza reduce la brecha entre la teoría y la práctica al preparar mejor a los futuros operadores e ingenieros para enfrentar los desafíos reales dentro del entorno industrial. La realidad aumentada, en este contexto, no solo

es una tecnología innovadora, sino un recurso para la formación técnica moderna que transforma un proceso riesgoso y complejo en uno seguro, eficiente y accesible.

A pesar de las ventajas que ofrecen los gemelos digitales en realidad aumentada en la formación técnica, debe reconocerse que el desarrollo presenta diferentes limitaciones que deben ser consideradas para su implementación, como la estabilidad y precisión del anclaje del modelo 3D, que están ligadas a factores externos como la luz y la calidad de la cámara, provocando una inestabilidad en el rastreo si el entorno de trabajo presenta sombras o reflejos en superficies metálicas.

REFERENCIAS

- Abad-Segura, E., González-Zamar, MD, Luque-de la Rosa, A., y Morales Cevallos, M.B. (2020). Sostenibilidad de las tecnologías educativas: Una aproximación a la investigación en realidad aumentada (Sustainability of Educational Technologies: An Approach to Research in Augmented Reality). *Sustainability*, 12(10), 4091. <https://doi.org/10.3390/su12104091>
- Al-Ansi, A. M., Jaboob, M., Garad, A., & Al-Ansi, A. (2023). Analyzing augmented reality (AR) and virtual reality (VR) recent development in education. *Social Sciences & Humanities Open*, 8(1), 100532. <https://doi.org/10.1016/j.ssho.2023.100532>
- Asad, U., Khan, M., Khalid, A., & Lughmani, W. A. (2023). Human-Centric Digital Twins in Industry: A Comprehensive Review of Enabling Technologies and Implementation Strategies. *Sensors*, 23(8), 3938. <https://doi.org/10.3390/s23083938>
- Attaran, M. y Celik, B.G. (2023). Gemelo digital: beneficios, casos de uso, desafíos y oportunidades (Digital Twin: Benefits, Use Cases, Challenges, and Opportunities). *Decision Analytics Journal*, 6, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>
- Bustamante-Limones, A., Rodríguez-Borges, C., & Pérez-Rodríguez, J. (2024). Evaluación del uso de gemelos digitales en los sistemas de producción (Evaluation of the Use of Digital Twins in Production Systems). *Aibi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 12(3), 195-204. <https://doi.org/10.15649/2346030X.4382>
- Chen, CP, y Wang, CH (2015). Employing Augmented-Reality-Embedded Instruction to Disperse the Imparities of Individual Differences in Earth Science Learning. *J Sci Educ Technol*, 24, 835-847. <https://doi.org/10.1007/s10956-015-9567-3>
- Fernandes, I.M., Pires, D.M., & Villamañán, R.M. (2014). Educación Científica con enfoque Ciencia-Tecnología-Sociedad-Ambiente. Construcción de un Instrumento de Análisis de las Directrices Curriculares (Scientific Education with a Science-Technology-Society-Environment Approach: Development of an Instrument for Analyzing Curriculum Guidelines). *Formación Universitaria*, 7(5), 23-32. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062014000500004>
- Jiang, Y, Kuan Li, Luo, H. & Kaynak, O. (2021). Aplicaciones industriales de gemelos digitales (Industrial applications of digital twins). *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379 (2207). <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0360>
- Koumpourous, Y. (2024). Revealing the true potential and prospects of augmented reality in education. *Smart Learn. Environ*, 11(2). <https://doi.org/10.1186/s40561-023-00288-0>
- Mendoza-Ramírez, C.E., Tudon-Martínez, J.C., Félix-Herrán, L.C., Lozoya-Santos, J. de J., & Vargas-Martínez, A. (2023). Realidad aumentada: Encuesta (Augmented Reality: Survey). *Applied Sciences*, 13(18), 10491. <https://doi.org/10.3390/app131810491>
- PTC. (2024). *Vuforia Engine: Realidad aumentada para aplicaciones interactivas* (Vuforia Engine: Augmented Reality for Interactive Applications). PTC. <https://www.ptc.com/es/products/vuforia/vuforia-engine>
- Qi, Q., y Tao, F. (2018). Gemelo digital y big data: hacia la fabricación inteligente y la industria 4.0: Comparación de 360 grados (Digital Twin and Big Data: Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0 – A 360-Degree Comparison). *IEEE Access*, 6, 3585-3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K.D. (2015). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 567-572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- Saracco, R. (2019). Gemelos digitales: conectando el espacio físico y el ciberespacio (Digital Twins: Connecting Physical Space and Cyberspace). *IEEE Computer*, 52(12), 88-91. <https://doi.org/10.1109/MC.2019.2942803>
- Van Dinter, R., Tekinerdogan, B. y Catal, C. (2022). Mantenimiento predictivo mediante gemelos digitales: Una revisión sistemática de la literatura (Predictive Maintenance through Digital Twins: A Systematic Literature Review). *Information and Software Technology*, 151, 107008. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008>

- Xamanek Rocha Gómez, F.S. (2024). *Prototipado de dispositivo para corte de carne de res para el proceso de deshidratado por inducción electromagnética y baja presión* (Prototyping a Device for Beef Cutting for the Dehydration Process via Electromagnetic Induction and Low Pressure). [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Zacatecas].
- Yao, J.-F., Yang, Y., Wang, X.-C., & Zhang, X.-P. (2023). Systematic review of digital twin technology and applications. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, 6(10). <https://doi.org/10.1186/s42492-023-00137-4>
- Zafar, M.H., Langás, E.F. y Sanfilippo, F. (2024). Explorando las sinergias entre la robótica colaborativa, los gemelos digitales, la aumentación y la industria 5.0 para la fabricación inteligente: Una revisión de vanguardia (Exploring Synergies between Collaborative Robotics, Digital Twins, Augmentation, and Industry 5.0 for Smart Manufacturing: A Cutting-Edge Review). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89, 102769. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102769>