

Simulador de tractor agrícola en Realidad Virtual para capacitación

Daniel N. Gómez-Balbuena ^{1*} y Emilio R. Morales-Maldonado¹

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Hidalgo

* Dirección para correspondencia: dngomez@iteshu.edu.mx

Imagina encontrarte en la cabina de un tractor de varias toneladas: accionas palancas y pedales y percibes la altura del vehículo, aunque en realidad sigues dentro del salón de clases. Lo que hasta hace pocas décadas pertenecía al terreno de la ciencia ficción hoy es posible gracias a la Realidad Virtual (RV). En términos técnicos, la RV es una tecnología interactiva que permite experimentar y actuar dentro de entornos digitales tridimensionales generados por computadora. Mediante dispositivos de visualización inmersiva y sistemas de interacción, crea la sensación de presencia —la percepción de estar físicamente dentro del entorno virtual (Burdea y Coiffet, 2003). Desde un enfoque pedagógico, la RV permite recorrer escenarios tridimensionales que reproducen el funcionamiento de maquinaria y procesos industriales, donde el estudiante puede tomar decisiones, cometer errores y aprender de ellos mediante retroalimentación inmediata. En este contexto surge el proyecto Tractor VR como respuesta a un desafío recurrente en la formación técnica: capacitar en la operación de maquinaria pesada sin depender exclusivamente de equipos reales, cuya disponibilidad se ve limitada por riesgos físicos, consumo de recursos y desgaste operativo. Frente a ello, el simulador ofrece

una alternativa eficiente al permitir que el aprendiz desarrolle habilidades motoras, comprenda la instrumentación básica y adquiera confianza antes de enfrentarse a un tractor real. Así, la RV no solo apoya la enseñanza, sino que reconfigura la curva de aprendizaje y amplía las formas de aproximarse a oficios que, hasta hace poco, dependían exclusivamente de la experiencia directa.

De cabinas sensoriales a visores

Hoy en día, al pensar en RV suelen venir a la mente visores que, colocados en la cabeza, cubren los ojos con pantallas y sensores para sumergir al usuario en mundos digitales. Sin embargo, sus orígenes se remontan a una búsqueda mucho más antigua: estimular los sentidos humanos para crear la ilusión de estar en otro lugar. Un antecedente fundamental es el sensorama de Morton Heilig, concebido a finales de los años cincuenta y patentado en 1962. Esta cabina sensorial proyectaba imágenes estereoscópicas acompañadas de sonido, vibraciones e incluso aromas. Aunque no era interactivo, el sensorama introdujo una idea que permanece vigente: la inmersión multisensorial como vía para intensificar la experiencia humana (Heilig, 1962). El siguiente gran salto ocurrió cuando la inmersión se combinó con la computación. En 1968, Ivan Sutherland y Bob Sproull desarrollaron el Sword of Damocles, considerado el primer visor montado en la cabeza (*head-mounted display*, HMD), que permitía interactuar en tiempo real con gráficos generados por computadora (Sutherland, 1968). A partir de este hito, la RV comenzó a

consolidarse como un entorno dinámico y no solo contemplativo. Durante los años noventa, sistemas como Virtuality llevaron esta tecnología a los centros de entretenimiento, incorporando visores HMD y dispositivos hápticos que ofrecían retroalimentación táctil básica; en ese contexto, Jaron Lanier popularizó el término "realidad virtual" (*virtual reality*) dentro de la industria emergente (Steuer, 1992). Este impulso técnico coincidió con la formulación de un marco conceptual decisivo: Slater y Wilbur (1997) distinguieron entre inmersión —las propiedades objetivas del sistema— y presencia —la sensación psicológica de "estar dentro" del entorno virtual—, una distinción que sigue orientando el diseño y la evaluación de sistemas contemporáneos. Con la llegada del nuevo milenio, la RV comenzó a trascender el entretenimiento para incorporarse a ámbitos profesionales. En arquitectura y diseño, por ejemplo, se utilizó para recorrer proyectos antes de ser construidos y mejorar la comprensión espacial (Whyte, 2002). De forma paralela, el aumento de la capacidad de cómputo y el desarrollo de motores gráficos más avanzados favorecieron simulaciones más realistas, fortaleciendo la sensación de presencia. Esta madurez tecnológica abrió la puerta a aplicaciones con impacto social directo, como en el ámbito de la salud, donde la RV se empleó en procesos de rehabilitación física mediante ejercicios en entornos virtuales controlados que combinan terapia y dinámicas lúdicas. En síntesis, la RV evolucionó desde cabinas sensoriales y prototipos de laboratorio hasta plataformas inmersivas con fundamentos teóricos y aplicaciones profesionales, reflejando la maduración de una idea central: aprender, entrenar y experimentar mediante la simulación.

Claroscuros de la inmersión: alcances y límites

La RV ha demostrado un alto potencial en la educación técnica al permitir la práctica de procedimientos en entornos inmersivos y controlados, y en operaciones donde el error tiene consecuencias materiales o de seguridad (Radianti *et al.*, 2020). No obstante, su adopción presenta limitaciones relevantes. El desarrollo e implementación de soluciones de RV requiere inversiones iniciales significativas en hardware, software y producción de contenidos, además de personal especializado para su mantenimiento y adaptación pedagógica (Merchant *et al.*, 2014). A ello se suma que ciertas habilidades dependen de sensaciones físicas difíciles de reproducir plenamente, y que factores como la fatiga visual o el mareo siguen siendo consideraciones en experiencias prolongadas. En conjunto, la efectividad de la RV depende de una implementación cuidadosa que articule costos, infraestructura y diseño pedagógico, entendiendo su integración como un proceso estratégico y no solo como la adopción de una tecnología emergente.

Realidad Virtual y educación técnica: una alianza poderosa

La RV ha dejado de ser una curiosidad tecnológica para convertirse en una herramienta pedagógica de alto impacto. Su capacidad para simular entornos tridimensionales inmersivos permite que el alumnado interactúe con objetos, herramientas y escenarios relevantes para la tarea, enfocando la práctica en

competencias psicomotoras —aquellas que integran percepción, coordinación y movimiento— y en la toma de decisiones. Gracias a motores gráficos y dispositivos hápticos —interfaces que proporcionan retroalimentación de fuerza y tacto—, la RV puede representar texturas, resistencias y desplazamientos. Esa dimensión sensorial añade información táctil y cinestésica a la experiencia: girar una palanca, pisar un pedal o manipular un acoplamiento deja de ser una instrucción abstracta y se vuelve una acción practicable (Figura 1).



Figura 1. Cabina virtual del simulador Tractor VR con identificación de controles e indicadores principales de operación (palancas, pedales e instrumentación del tablero).

La RV se integra en el ecosistema XR —que incluye la realidad aumentada y mixta— para habilitar experiencias combinadas que articulan la visualización de conceptos con su aplicación práctica. La evidencia reciente indica que este enfoque mejora la comprensión de contenidos complejos, la retención y la motivación en áreas técnicas, al promover un aprendizaje activo basado en la interacción, la experimentación y la toma de decisiones, con efectos positivos en la transferencia

a situaciones reales. Asimismo, los simuladores permiten personalizar la experiencia mediante el ajuste de la dificultad, la retroalimentación inmediata y el registro de métricas de desempeño útiles para la evaluación formativa, como el tiempo en tarea, la tasa de error o la adherencia a protocolos, una flexibilidad especialmente estratégica en contextos con acceso limitado a maquinaria. En la práctica, el impacto educativo de la RV depende de un diseño instruccional claro, de criterios de seguridad y de evaluaciones que verifiquen la transferencia de habilidades. Con ese marco, el siguiente apartado presenta Tractor VR, un ejemplo de cómo llevar estas premisas al entrenamiento de maquinaria agrícola.

Tractor VR: del diseño instruccional a la capacitación técnica

En el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, la formación teórica se ha extendido hacia el uso de experiencias inmersivas que permiten mitigar las barreras económicas de la instrucción agrícola. El proyecto Tractor VR surge como respuesta a la limitada disponibilidad de maquinaria pesada; mientras un tractor real puede representar una inversión superior a los \$850,000 pesos, la simulación ofrece una alternativa segura y accesible. El simulador recrea un entorno agrícola inspirado en los paisajes de la región hidalguense e incorpora un instructor virtual con forma de coyote —referente cultural local— que guía al estudiante paso a paso a través de niveles progresivos (Figura 2), donde inicia con el reconocimiento y la comprensión

funcional de los sistemas clave del tractor, como el sistema hidráulico y la toma de fuerza, introducidos desde su papel básico en la operación agrícola.



Figura 2. Instructor virtual del simulador Tractor VR con forma de coyote, utilizado para guiar al estudiante en el aprendizaje progresivo de la operación del tractor.

Sobre esta base, el proceso formativo avanza hacia la ejecución de maniobras de mayor complejidad, como el acoplamiento de implementos y la aplicación de protocolos operativos de encendido conforme al manual técnico, así como el desarrollo de prácticas de mantenimiento preventivo de fluidos y neumáticos y la interpretación básica de la instrumentación del tablero, como la presión de aceite y las revoluciones por minuto (RPM). Este recorrido, diseñado para públicos juveniles y mediado por experiencias gamificadas en RV, fue estructurado mediante la adopción del modelo de diseño instruccional ADDIE

(Molenda, 2003), cuyas fases secuenciales —análisis, diseño, desarrollo, implementación y evaluación— permitieron sostener un enfoque pedagógico riguroso, asegurando que cada elemento del entorno virtual respondiera a objetivos formativos claros y evaluables, alineados con el desarrollo progresivo de competencias técnicas operativas. La construcción de Tractor VR se fundamentó en una arquitectura modular desarrollada en Unity, concebida para integrar de manera coherente el diseño instruccional con la ingeniería de software. Este enfoque permitió estructurar un flujo de trabajo eficiente y replicable, que inició con el modelado tridimensional del tractor en SolidWorks para asegurar la precisión mecánica de sus componentes, seguido de la optimización de mallas y texturas en Blender, proceso indispensable para mantener una experiencia visual fluida en entornos de RV.

La interacción del usuario se gestionó mediante el ecosistema XR Plug-in Management y el XR Interaction Toolkit, lo que facilitó la programación en C# de colisiones, activadores y sistemas de locomoción necesarios para simular de forma segura y controlada las acciones propias de la operación agrícola. Gracias a esta configuración, cada interacción —desde el accionamiento de controles hasta el acoplamiento de implementos— ofrece una respuesta inmediata y comprensible. Desde el punto de vista pedagógico, cada nivel del simulador fue diseñado como una misión educativa gamificada, en la que el estudiante debe completar tareas específicas para avanzar.



Figura 3. Validación pedagógica y práctica grupal del simulador Tractor VR en el Laboratorio de Cómputo del Instituto Tecnológico Superior de Huichapan (ITESHU).

La ambientación agrícola, inspirada en los paisajes de Hidalgo, México, junto con un entorno dinámico y elementos interactivos derivados de modelos CAD optimizados, contribuye a una experiencia inmersiva que favorece la comprensión contextual de los procesos agrícolas. La Figura 3 ilustra una sesión de validación grupal realizada en el laboratorio de cómputo del ITESHU, donde los estudiantes interactúan con el simulador bajo supervisión técnica. La estructura de aprendizaje sigue un flujo progresivo que articula teoría y práctica: inicia con una evaluación diagnóstica de conocimientos previos, continúa con la introducción de fundamentos de seguridad y operación, y culmina con la ejecución de maniobras básicas y el manejo de paneles de control. Este proceso es acompañado por dos figuras clave: el estudiante, como actor principal, y el instructor virtual con forma de coyote, que guía paso a paso cada desafío y proporciona retroalimentación inmediata. La

validación del simulador se llevó a cabo con estudiantes de entre 18 y 25 años, con y sin experiencia previa en maquinaria agrícola, lo que permitió observar su funcionamiento en condiciones cercanas al uso real. Los resultados muestran una mejora clara en el desempeño: el tiempo necesario para completar correctamente la secuencia básica de operación se redujo en un 40 % en comparación con métodos tradicionales, acompañado de una disminución en errores críticos. Asimismo, la evaluación de usabilidad, medida mediante la escala System Usability Scale (SUS), indicó una alta aceptación del sistema, lo que sugiere que la experiencia resulta accesible incluso para usuarios sin experiencia previa.

Para garantizar la estabilidad sensorial y la seguridad del usuario, se mantuvo la latencia (retraso entre la acción del usuario y la respuesta visual en una pantalla de entorno virtual) del sistema por debajo de los 20 milisegundos, umbral recomendado para prevenir la desorientación espacial en entornos de RV (Ramaseri Chandra *et al.*, 2022). De manera complementaria, se implementaron técnicas de occlusion culling (ocultamiento de geometría no visible) y baked lighting (iluminación precalculada), con el fin de optimizar la carga de cálculo y asegurar un rendimiento estable durante la interacción. Estas decisiones técnicas permiten que el estudiante desarrolle destreza operativa sin los riesgos asociados a la maquinaria real. En conjunto, este enfoque posiciona a Tractor VR como una herramienta de transferencia tecnológica con impacto social, capaz de ampliar el acceso a la capacitación agrícola mediante una simulación educativa validada, portable y adaptable a distintos contextos formativos. Más allá de su dimensión tecnológica, el

proyecto muestra cómo la RV puede funcionar como un medio de mediación educativa con sentido social, al trasladar la operación de maquinaria agrícola a un entorno inmersivo que reduce barreras económicas y riesgos físicos, y que al mismo tiempo reconfigura la forma en que los jóvenes se aproximan al aprendizaje técnico mediante la integración de cultura local, juego y práctica simulada.

Esta experiencia pone de relieve que la innovación educativa no depende exclusivamente del acceso a infraestructura costosa, sino de la capacidad de articular pedagogía, tecnología y contexto, consolidando a Tractor VR como un puente entre el conocimiento especializado y las realidades educativas de las regiones rurales, y ampliando las posibilidades de una capacitación agrícola más accesible, significativa y sostenible.

Nota

Este artículo fue revisado con el apoyo de herramientas de inteligencia artificial, empleadas únicamente para mejorar la claridad y la redacción del texto. El contenido, el análisis y las conclusiones son responsabilidad exclusiva de los autores.

Referencias

Burdea GC and Coiffet P (2003). Virtual reality technology (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.

Heilig ML (1962). Sensorama simulator. U.S. Patent No. 3,050,870. U.S. Patent and Trademark Office.

Radianti J, Majchrzak TA, Fromm J and Wohlgenannt I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education* 147:1-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>.

Molenda M (2003). In search of the elusive ADDIE model. *Performance Improvement* 42(5):34–36. DOI: <https://doi.org/10.1002/pfi.4930420508>.

Ramaseri Chandra AN, El Jamiy F and Reza H (2022). A Systematic Survey on Cybersickness in Virtual Environments. *Computers* 11(4):51. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers11040051>.

Slater M and Wilbur S (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6(6):603–616. DOI: <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>.

Steuer J (1992). Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. *Journal of Communication* 42:73-93. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x>.

Sutherland IE (1968). A head-mounted three-dimensional display. Proceedings of the Fall Joint Computer Conference 33:757–764. DOI: <https://doi.org/10.1145/1476589.1476686>.

Whyte J and Nikolić D (2002). *Virtual Reality and the Built Environment* (1st ed.). United Kingdom: Routledge. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780080520667>.

Merchant Z, Goetz ET, Cifuentes L *et al.* (2014). Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis. *Computers & Education* 70:29-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.07.033>.