

Entrenamiento con Realidad Extendida en Centro de Maquinado de Control Numérico CNC – Revisión Sistemática

Extended Reality Training for Computer Numerical Control (CNC) Machine - A Systematic Review

Mónica del Carmen Bumas Azcanio^a, Gerardo Hernández Neria^b, Sergio Teodoro Vite^{c*}

^a Unidad Académica de Diseño Ciencia y Tecnología, Universidad Autónoma de Guadalajara. Av. Patria 1201, 45129, Zapopan, México. monica.bumas@edu.uag.mx

^b Departamento Académico de Computación e Industrial, Universidad Autónoma de Guadalajara. Av. Patria 1201, 45129, Zapopan, México. gerardo.neria@edu.uag.mx

^c Facultad de Ingeniería, Departamento de Computación, División de Ciencias Básicas, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad 3000, 04510 CDMX, México. sergio.teodoro@ingenieria.unam.edu

* autor por correspondencia

RESUMEN

La industria manufacturera demanda cada vez más personal capacitado para el correcto manejo en los centros de maquinado. No obstante, las oportunidades de entrenamiento se ven limitadas por el acceso restringido a estos equipos, ya que las prácticas requieren de la disponibilidad de un centro de maquinado para ser realizadas. Además, el uso incorrecto implica riesgos de daños al equipo, pérdidas económicas e incluso accidentes. En este contexto, la Realidad Extendida (RX) se ha posicionado como una alternativa viable al ofrecer entornos controlados y libres de riesgos para el desarrollo de competencias operativas. Este análisis presenta una revisión sistemática de literatura en la última década, siguiendo el método PRISMA, para examinar el uso de tecnologías de RX en la capacitación de personal en centros de maquinado de control numérico computarizado CNC, la complejidad de las máquinas involucradas y métricos de validación experimental. El análisis revela que la RX constituye una solución factible y con gran potencial para la formación técnica. Asimismo, se prevé que su efectividad se verá incrementada con los avances tecnológicos en dispositivos RX y con la incorporación de tecnologías emergentes como es el caso de inteligencia artificial e internet de las cosas, así como dispositivos y elementos que integren los 5 sentidos. Estos desarrollos permitirán entornos de entrenamiento cada vez más inmersivos y realistas, favoreciendo a la adquisición de competencias más eficiente y una mejora en la seguridad operativa.

Palabras clave: Realidad Extendida, Realidad Virtual, Realidad Aumentada, Centro de Maquinado de Control Numérico.

ABSTRACT

The manufacturing industry increasingly requires engineers with specialized skills in the procedural operation of machining centers. However, training opportunities are often constrained by limited access to this equipment, as practical exercises necessitate the availability of a machining center. Furthermore, improper use during training poses risks of equipment damage, financial losses, and potential accidents.

In this context, Extended Reality (XR) technologies have emerged as a viable alternative, offering controlled, risk-free environments for the development of operational competencies. This paper presents a systematic

literature review conducted over the past decade, adhering to the PRISMA methodology, looking for insights of the state of art related of applying any RX technologies, to provide training in the manufacturing industry, specifically in numerical control machining centers, examining the application of XR in training for machining centers. The review focuses on the software. technologies and XR modalities employed, the complexity of the machining centers addressed, and the metrics utilized for experimental validation.

The analysis indicates that XR represents a feasible and promising approach for technical training in this domain. Moreover, its potential is expected to be enhanced by ongoing technological advancements in XR devices, as well as by the integration of emerging technologies such as artificial intelligence, the Internet of Things, and multisensory systems capable of engaging all five senses. These developments are anticipated to foster increasingly immersive and realistic training environments, thereby contributing to more effective skill acquisition and improved operational safety.

Keywords: Extended Reality, Virtual Reality, Augmented Reality, Numerical Control Machining Center.

1. Introducción

En la industria manufacturera, es fundamental el uso de centros de maquinado de control numérico por computadora (CNC) para fabricar piezas complejas mediante procesos de desbaste de viruta. Estas máquinas permiten conseguir piezas con un alto nivel de detalle y precisión. La operación de una máquina CNC involucra actividades y procedimientos que repercuten en la seguridad y eficiencia en el tiempo de producción y la calidad del resultado, por lo que el uso correcto del equipo es crucial. Un procedimiento inadecuado puede impactar en daños a la máquina o sus componentes y generar desperdicios de material, lo que se traduce en gastos innecesarios. Asimismo, es importante destacar que el aprendizaje en el uso de herramientas mecánicas complejas enfrenta dos limitantes principales: en primer lugar, el elevado costo y la limitada disponibilidad de los equipos restringen de manera considerable las oportunidades de práctica y, en el ámbito industrial, pueden implicar la suspensión temporal de la producción para desarrollar actividades de capacitación. En segundo lugar, la presencia de un facilitador debidamente cualificado es un requisito indispensable para garantizar tanto la operación segura del equipo como la apropiación adecuada del proceso por parte de los aprendices. (Aruanno et al., 2024).

Para abordar estas limitaciones en el aprendizaje y capacitación para el uso de herramientas mecánicas complejas, han surgido tecnologías que ofrecen alternativas de solución, entre las cuales destaca la Realidad Extendida (RX), término general que abarca tecnologías inmersivas tales como Realidad Aumentada (RA), Realidad Virtual (RV) y Realidad Mixta (RM); las cuales están obteniendo cada vez mayor aceptación y uso, debido a que permiten crear entornos virtuales con elementos definidos y controlados que posibilitan al usuario la interacción con éstos y el aprendizaje mediante experiencias vividas. La RV, consiste en introducir al usuario en un ambiente intangible que involucra elementos de nuestra realidad virtualizados, cuyo objetivo final es proporcionar una experiencia inmersiva; mientras que la RA superpone información o elementos virtuales sobre nuestro entorno físico real, permitiendo que ambos mundos, el físico y el digital, coexistan y se complementen (Vite, S.T. 2023). Por su parte, la RM, fusiona el mundo real con el virtual de manera que los objetos digitales interactúen con los objetos físicos. Esto crea una experiencia donde lo virtual y lo real coexisten e influyen mutuamente, abarcando un espectro más amplio que la RA, la cual simplemente superpone imágenes virtuales sobre el entorno real sin permitir interacción directa.(Grabowski, 2020).

A pesar de que la RX es comúnmente relacionada con la industria de los videojuegos, sus aplicaciones se han extendido con éxito a diversos ámbitos profesionales. Por ejemplo, en el campo de la biomédica (Yuan et al.,2023) y en el área de la salud ha sido implementada con éxito en procesos terapéuticos (Quintana et al., 2024), en terapias para el manejo de ansiedad (Yuen et al., 2025), en tratamientos de parálisis facial (Edalati et al., 2025), y como un método emergente para reducir los

problemas mentales de los adultos mayores (Fung & Ling, 2025). Asimismo, se ha empleado en simulaciones complejas para el entrenamiento en cirugía y el perfeccionamiento de procedimientos médicos (Grabowski, 2021), como herramienta de accesibilidad para acercar el arte a personas con discapacidad (Gatto et al., 2025), y en desarrollos orientados a fomentar la empatía (Jiang et al., 2025). Por otra parte, el mercado de las experiencias inmersivas ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años. Actualmente, más de 171 millones de personas utilizan la RV, y se prevé que esta tendencia continúe en aumento hasta 2030 (Kumar, 2025). Como consecuencia de esta creciente popularidad, tecnologías como la RA y RV están siendo progresivamente adoptadas por educadores en distintos niveles académicos, ya que permiten enriquecer la experiencia de aprendizaje de los estudiantes y mejorar su desempeño en futuras actividades profesionales (McGovern et al., 2020). No obstante, la capacitación en los procesos de fabricación actuales continúa dependiendo, en gran medida, de métodos pedagógicos tradicionales que mantienen una separación entre la formación teórica y la práctica (De Giorgio et al., 2023). En este contexto, la RX se ha consolidado como una alternativa viable, al proporcionar entornos de aprendizaje controlados y libres de riesgos que facilitan el desarrollo de competencias operativas.

Ante este panorama, el presente trabajo tiene como objetivo presentar una revisión sistemática de la literatura publicada durante la última década sobre la aplicación de tecnologías de RX en la capacitación del personal de la industria manufacturera, con énfasis en los centros de maquinado CNC. La revisión se estructura siguiendo los lineamientos del método PRISMA (por sus siglas en inglés: *The Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analyses*) (Moher et al., 2009), lo que permite analizar de manera integral el estado actual de la aplicación de la RX en este contexto.

De manera particular, el estudio se propone: (a) cuantificar el volumen de investigaciones existentes, (b) identificar las plataformas de desarrollo y dispositivos tecnológicos empleados, (d) explorar la relación entre la tecnología RX utilizada y la complejidad de los centros de maquinado, (c) clasificar los tipos de tareas de entrenamiento abordadas y (e) examinar las pruebas experimentales aplicadas para la validación de estas investigaciones. A partir de este análisis, se busca identificar brechas en la tecnología RX que demandan mayor atención por parte de la comunidad investigadora, constituyendo así un punto de partida para el diseño y desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas para la formación y operación en máquinas CNC. Con este fin, la revisión se guía por las siguientes preguntas de investigación:

P1: ¿Cuál es el número de investigaciones publicadas en los últimos años que analizan el uso de tecnologías de RX en el entrenamiento de personal en centros de maquinado de control numérico?

P2: ¿Cuáles son las plataformas de desarrollo de software y los dispositivos tecnológicos empleados en aplicaciones de entrenamiento basadas en RX para centros de maquinado CNC?

P3: ¿Existe alguna relación entre la tecnología de RX utilizada en las aplicaciones de estudio y el nivel de complejidad del centro de maquinado CNC?

P4: ¿Qué tipos de tareas de entrenamiento se abordan mediante tecnologías de realidad extendida en los distintos centros de maquinado CNC?

P5: ¿Cuáles son las pruebas experimentales más usadas para validar las investigaciones de entrenamiento en centros de maquinado CNC con RX?

El conjunto de preguntas planteadas busca ofrecer un marco de referencia que oriente futuras investigaciones y el desarrollo de soluciones tecnológicas más alineadas con las necesidades reales de formación y operación en máquinas CNC.

2. Métodos de búsqueda

Esta revisión sistemática incluyó una búsqueda primaria relacionada sobre la aplicación de la RX en cualquiera de sus variantes, RV, RA, RM, así como otras herramientas que integran elementos virtuales en la capacitación y entrenamiento del personal que opera centros de maquinado CNC. El proceso de búsqueda y selección siguió el método PRISMA (por sus siglas en inglés: *The Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analyses*) (Moher et al., 2009).

Se realizó una búsqueda que comprende el periodo desde 2016 hasta septiembre 2025 en repositorios con un mayor índice de referencia, tales como Scopus, Science Direct, IEEE, Springer y ACM Digital Library, con los siguientes operadores booleanos y términos en inglés descritos en la ecuación 1:

$$\begin{aligned} & ((\text{Extended Reality OR Augmented Reality OR Virtual Reality OR Mixed Reality}) \\ & \text{AND (Training OR Teaching) AND (CNC, OR "Computer Numerical Control")}) \end{aligned} \quad (1)$$

A partir de esta búsqueda se incluyeron todas aquellas publicaciones relacionadas con la RX, RA y RV como elemento fundamental para el entrenamiento o capacitación en el uso de centros de maquinado de control numérico como se muestra en la Figura 1.

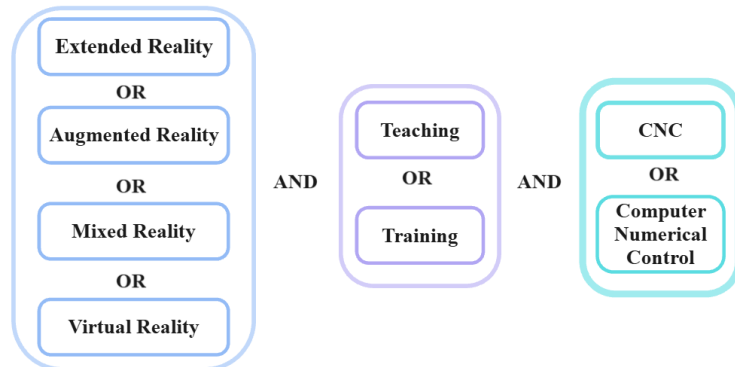


Figura 1. Diagrama del operador booleano de búsqueda inicial

Se consideraron aquellos reportes de investigación que incorporan en el entrenamiento intervenciones mediante dispositivos de RX, RV, RA y RM, así como entornos o animaciones virtuales mediante animaciones por computadora.

Se seleccionaron estudios que incluyen el uso de la herramienta de RX en cualquiera de sus modalidades como desarrollo innovador del entrenamiento, o bien que comparen el método tradicional de formación con otras tecnologías de RX, donde pueden o no realizar validaciones experimentales.

2.1 Extracción de datos

Como resultado inicial de la búsqueda booleana, la base de datos Scopus arrojó 196 documentos. Al aplicar un primer filtro temporal restringiendo la búsqueda a aquellos reportes de investigación publicados del 2016 al 2025, el número de registros se redujo a 175.

En una segunda etapa, se realizó la lectura de los resúmenes para seleccionar únicamente aquellos artículos que describieran intervenciones de entrenamiento en entornos de fabricación aplicando tecnología RX, RV, RA o RM. En esta fase se evitaron y excluyeron aquellos elementos que no consideraran centros de maquinado CNC, que fueran específicos de ensamblaje de partes, o que estuvieran relacionados con entrenamiento de manufactura aditiva. A partir de ello, la selección se redujo a 5 publicaciones.

Se realizó el mismo proceso de búsqueda y se obtuvieron resultados con los siguientes resultados preliminares: Science Direct 1322, IEEE 20, Springer 165 y ACM 539. Posteriormente, se filtraron los datos con las mismas especificaciones de elementos ajenos a los centros de maquinado en CNC y la exclusión de estudios enfocados en ensamblaje o manufactura aditiva. Después de este proceso, el número de artículos potencialmente relevantes fue el siguiente: Scopus 6, Science Direct 8, IEEE 1, Springer 4 y ACM 2. Finalmente, se revisaron en texto completo los estudios preseleccionados, para seleccionar aquellos que cumplieran con los criterios de elegibilidad definidos y descartar los registros duplicados entre bases de datos. Obteniendo como resultado un total de 21 publicaciones, como se resume en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.

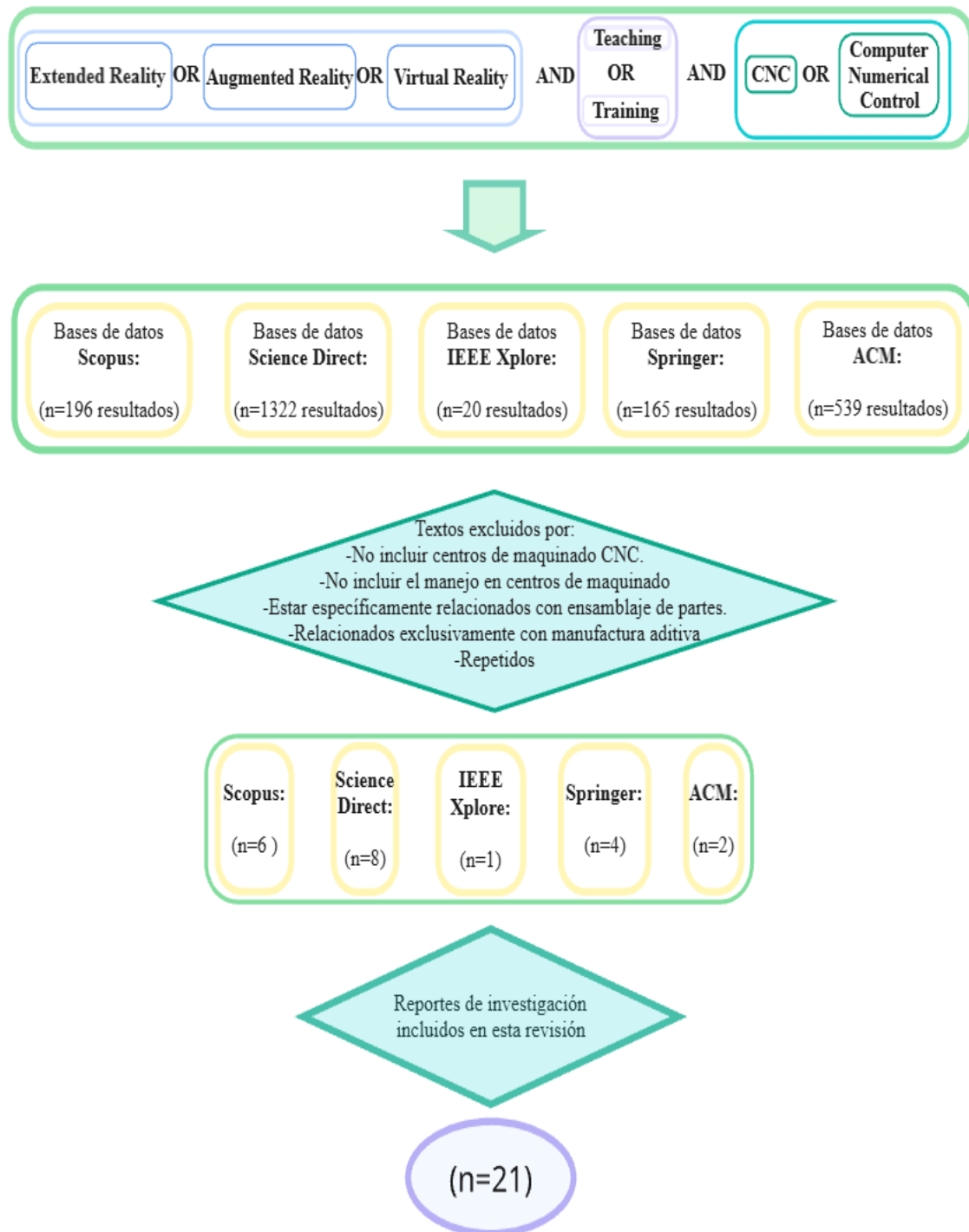


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de revisión sistemática.

3. Resultados

Las 21 publicaciones seleccionadas se trataron mediante un riguroso análisis que permitiera resolver las preguntas iniciales. A continuación, se describen los resultados obtenidos:

3.1 Publicaciones por año y por país

Como se mencionó anteriormente, el periodo de selección de reportes de investigación se cerró a los

últimos 10 años para profundizar en la evolución e impacto en el desarrollo de tecnologías de RX. Las publicaciones de artículos relacionadas con el entrenamiento en RX, específicamente para el área de centros de maquinado CNC se han mantenido bajas, sobre todo en los primeros años de la última década, con un rango de artículos publicados de 1 a 2; se muestra un incremento mayor en 2023, como se observa en la Figura 3.

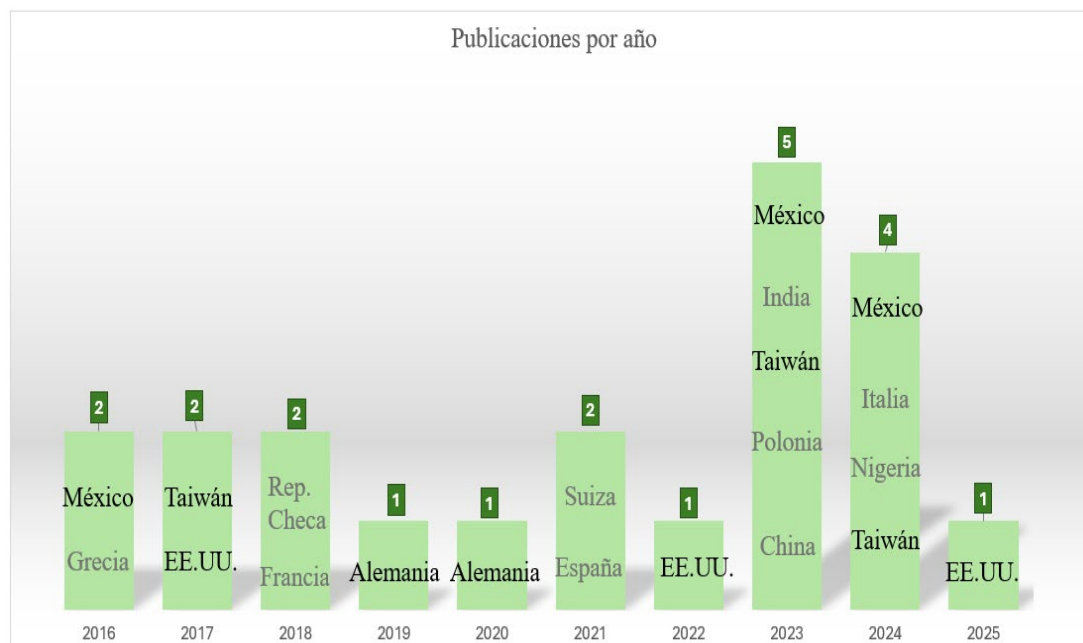


Figura 3. Publicaciones relacionadas con entrenamiento o desarrollo de habilidades en Centro de maquinado de control numérico CNC en los últimos 10 años.

Este incremento durante 2023 puede estar relacionado con el COVID-19, presente principalmente en el 2020, ya que las medidas implementadas para enfrentar la situación concerniente a la pandemia provocaron la búsqueda de tecnología como una solución alternativa en la educación o entrenamiento (Paszkievicz et al., 2023), y por el tiempo que comúnmente transcurre desde que se realizan las investigaciones hasta que son aprobadas y publicadas. Sin embargo, durante el 2024, casi se mantiene el número con tendencia positiva y mayor que en los años anteriores. Es probable que sea debido a las mejoras tecnológicas en los dispositivos y los resultados conseguido a partir del impulso generado por los desarrollos del 2023.

En el año actual se observa solo un reporte, pero dado que aún no concluye, es probable que el número crezca en los siguientes meses.

Respecto a los países, en esta revisión se encontró que en los últimos 10 años EE. UU., Taiwán y México han reportado 3 investigaciones, le siguen, Alemania y con 2 publicaciones. Mientras que China, España, Francia, Grecia, India, Italia, Nigeria, Polonia, República Checa y Suiza presentan una investigación. En la Figura 3 se puede observar que México presentó una investigación al inicio de la década, durante el 2023 en la búsqueda de soluciones por la pandemia y en el 2024, muy similar a Taiwán.

A partir de estos resultados iniciales, se dividieron las investigaciones por el tipo de “virtualidad” aplicada en cada una de las investigaciones (Proyección, en computadora, RA combinada con maqueta física, solo RA, RV), como lo muestra la gráfica de la Figura 4. En los reportes se encontró que (Nathanael et al., 2016) realiza una propuesta de RM que mezcla la manipulación de una maqueta del tablero, una rueda de control y una proyección en pared de la maquina CNC. Dentro de ese concepto de realidad mixta, años más tarde, con el avance tecnológico (T. J. Chuang et al., 2023), propone un sistema de entrenamiento con RA para la tarea de ajuste en la longitud de la herramienta, añadiendo una maqueta física que puede ser operada con las manos y cuya finalidad es aplicar aspectos tácticos y físicos de la maquina real, que combina con componentes virtuales como el

husillo, una herramienta de fresado y una pieza de trabajo. Se puede apreciar el intento de mezclar realidades virtuales con maquetas físicas y tangibles, muy probablemente debido a la necesidad de generar sensaciones hápticas que permitan tener la sensación de lo que se está realizando.

Algunos otros trabajos, utilizan la virtualidad a través de las computadoras, tal es el caso de España con (Carretero et al., 2021) que integra una plataforma de gestión de aprendizaje LMS (por sus siglas en inglés Learning Management System) para las evaluaciones del aprendizaje, mientras que en China (Liu et al., 2023), se desarrolla una simulación por computadora que incluye navegación virtual y despiece de un centro de maquinado cuya finalidad es comunicar los elementos y componentes para familiarizar a los usuarios con la terminología.

En desarrollos exclusivos de RA, desde México (Monroy Reyes et al., 2016), la aplica en su estudio, así como Francia (Tzimas et al., 2019), Alemania (Kesler et al., 2020), México (Hernández-Rodríguez & Guillén-Yparrea, 2023a), India (Sorathiya et al., 2023), Italia (Aruanno et al., 2024) y Nigeria (Prasetya et al., 2024).

Mientras que en el ámbito de RV la incluyen EE. UU. (Rogers et al., 2017) (Ryan et al., 2022), Taiwan (Kao et al., 2017), República Checa (Kroupa et al., 2018), Alemania (Kesler et al., 2020), Suiza (Hirt et al., 2021), Polonia (Paszkievicz et al., 2023) y México (Ibarra Kwick et al., 2024).

Los recientes trabajos abordan temas que involucran tecnología más allá del simple uso de la virtualidad, como es el caso de (T. J. Chuang et al., 2023) que propone un laboratorio a distancia de múltiples estudiantes; en tanto que (Kaarlela & Outeiro, 2025), presentan un concepto de máquina cyber física manipulada a distancia dentro de los lineamientos de la industria 4.0.

En total, se han reportado las siguientes aplicaciones en las investigaciones:

- 1 en proyección en pared
- 4 simulación por computadora
- 9 en realidad aumentada
- 1 realidad mixta (RA + maqueta física)
- 10 en realidad virtual

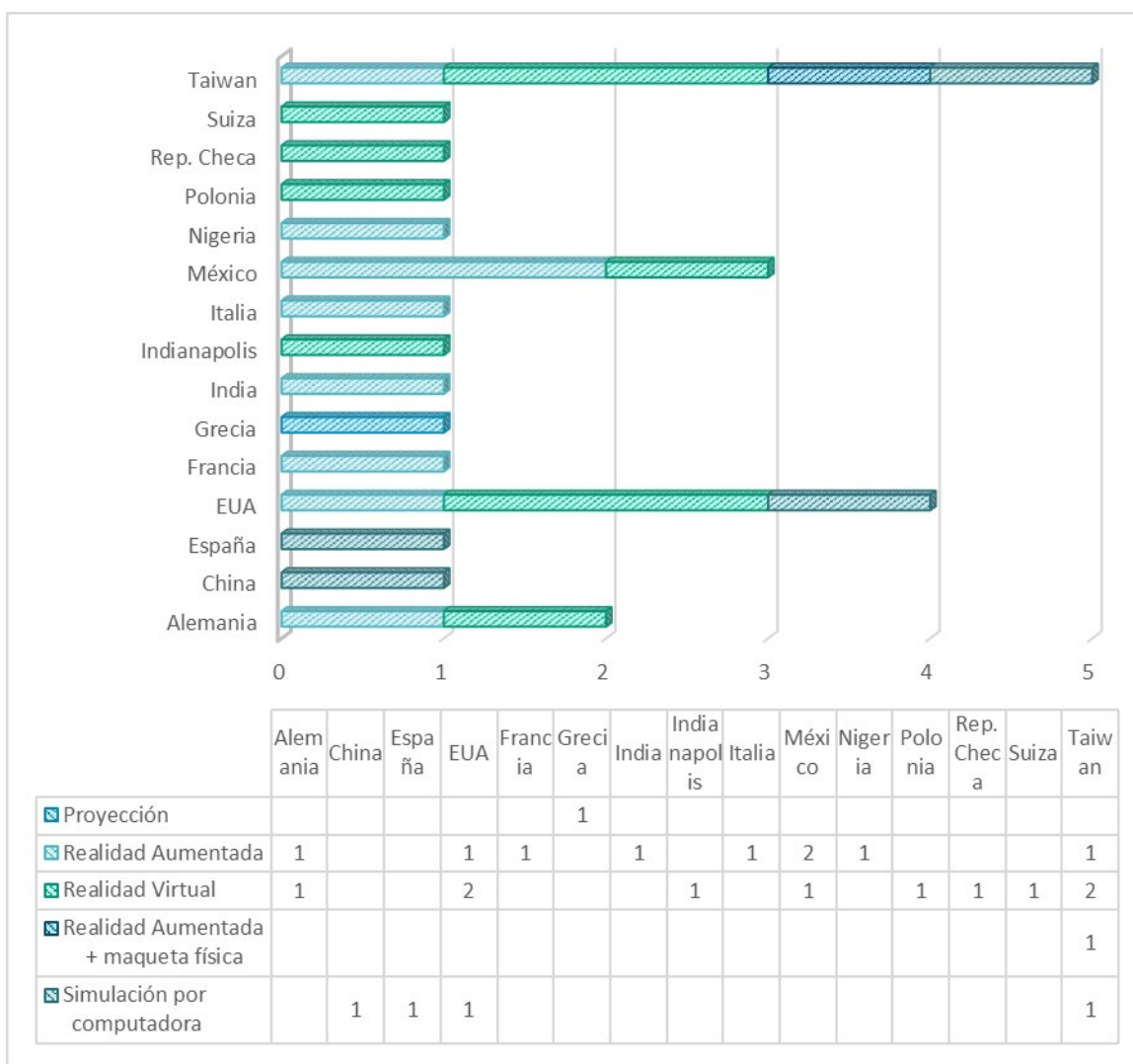


Figura 4. Publicaciones relacionadas con entrenamiento o desarrollo de habilidades en centro de maquinado de control numérico CNC en los últimos 10 años.

3.2 Software utilizado para el desarrollo de la virtualidad

Para el desarrollo de una aplicación de RX orientada al entrenamiento en centros de maquinado CNC, resulta fundamental contar, como punto de partida, con un modelo virtual detallado del propio centro de maquinado. Asimismo, es necesaria la incorporación de otros elementos y recursos digitales que habiliten la interacción del usuario y garanticen el correcto funcionamiento de la experiencia inmersiva. No obstante, en dos de los estudios analizados no se especifica el software utilizado para la generación de dichos modelos y componentes digitales. (Hirt et al., 2021 y Paszkiewicz et al., 2023).

En contraste, los trabajos que describen explícitamente el modelado tridimensional, ya sea para su proyección (Nathanael et al., 2016) o manipulados mediante la computadora (Liu et al., 2023), tienden a emplear software CAD de Dassault Systèmes, ya sea Solid Works o 3D experience, incluso su plataforma Virtools que permite crear aplicaciones 3D interactivas (Nathanael et al., 2016). Sin embargo, los datos encontrados recopilados en esta revisión indican que la plataforma más utilizada para el desarrollo de aplicaciones de RX es Unity 3D, software libre que permite personalizar y diseñar la experiencia en RX, al que se le pueden agregar y ampliar sus funcionalidades mediante la incorporación de conjuntos de herramientas, scripts y documentación especializada. Su uso se reporta en 10 desarrollos de RA, y 6 de RV. Incluso (T. J. Chuang et al., 2023), también la utiliza en su

propuesta donde combina RA con una maqueta física para dar una experiencia viso-háptica.

En cuanto a las aplicaciones de RA, la plataforma Vuforia destaca como una de las más utilizadas en combinación con Unity 3D, ya que se menciona en 4 de los 10 estudios. Todos estos datos se muestran en la gráfica de la Figura 5.

Cabe destacar que algunas investigaciones reportan haber desarrollado la experiencia en diversas modalidades de virtualidad, principalmente con el objetivo de hacer una evaluación comparativa.

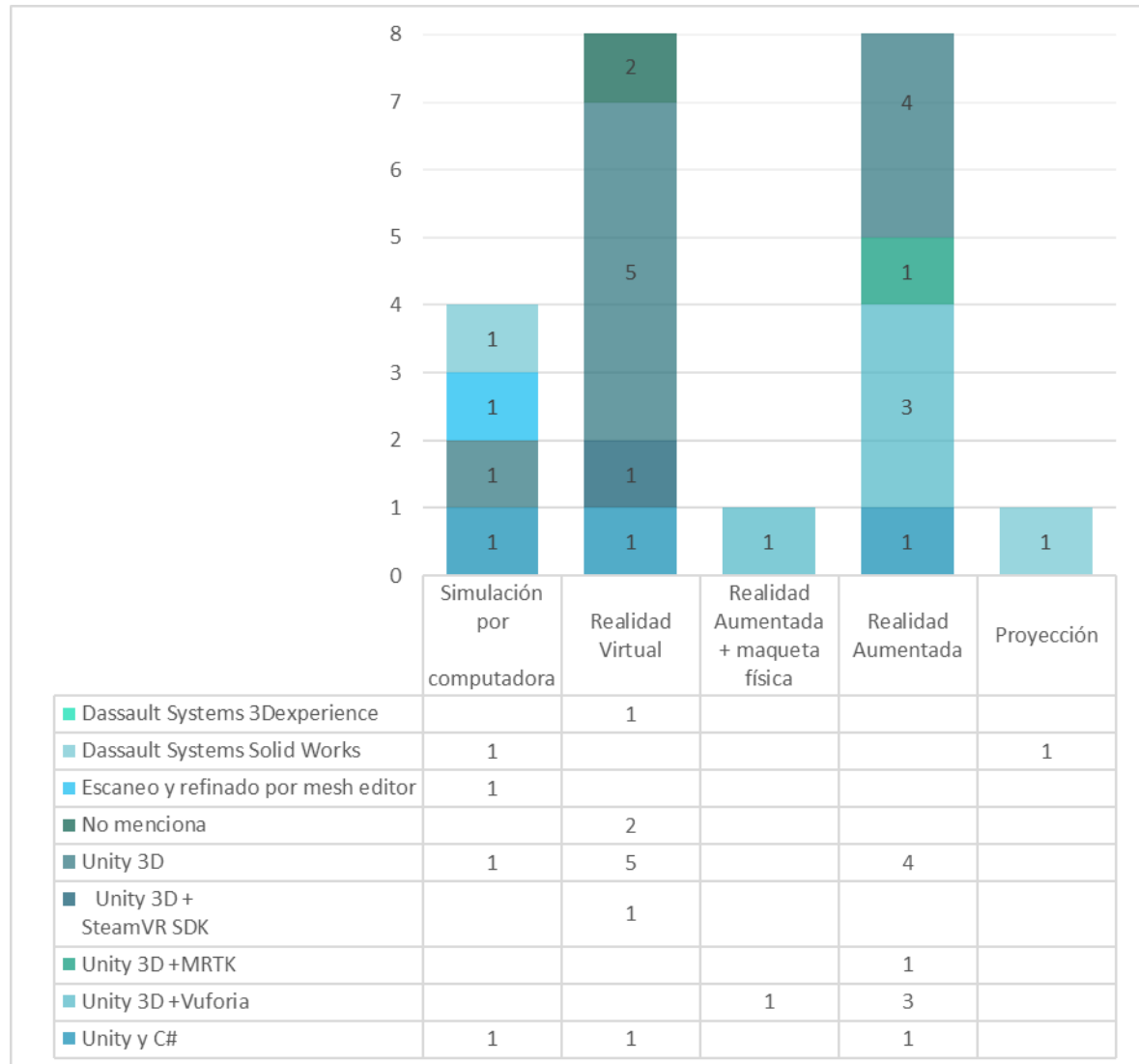


Figura 5. Software utilizado para desarrollar la aplicación virtual por tipo de realidad

3.3 Dispositivo de realidad virtual o aumentada utilizado para el desarrollo de la experiencia virtual

En una experiencia de RA, el usuario visualiza imágenes superpuestas sobre la visión natural que suelen ser gráficos, textos o modelos 3D a través de dispositivos como gafas, proyectores de video, u otros dispositivos electrónicos como tabletas o teléfonos inteligentes (Arnaldi, 2018).

En contraste, la RV crea una experiencia tridimensional de 360° de un ecosistema artificial simulado por computadora mediante los antes conocidos como “cascos de RV”, que con el tiempo evolucionaron a lentes o visores HMD (por sus siglas en inglés *head mounted display*). Estos dispositivos permiten aislar al usuario del entorno real y ofrecer una experiencia inmersiva, consistente y atractiva a partir de la presentación de imágenes generalmente estereoscópicas y la

incorporación de audio envolvente. Una combinación sensorial que contribuye a recrear la sensación de presencia en un entorno virtual tridimensional.

Para conseguirlo, el sistema presenta imágenes ligeramente diferentes para cada ojo, lo que contribuye a recrear la percepción de profundidad y espacio (Grabowski, 2021). Además de ello, la RV puede incorporar efectos de sonido mediante altavoces y auriculares y funciona en diferentes configuraciones: conectado a una computadora, a un teléfono inteligente montado en un visor de cartón tipo “Google Cardboard” (Google, 2025), enlazado a una consola de videojuegos, o bien, funcionar de manera autónoma y procesar los gráficos internamente para ejecutar las aplicaciones de RV de manera inalámbrica. Ejemplos: Oculus Rift, HTC Vive, o Meta Quest.

Al respecto, la gráfica de la Figura 6 muestra que históricamente, los *Microsoft HoloLens*, en sus diferentes versiones actualizadas según el año de la aplicación, han sido los dispositivos más utilizados en los desarrollos con RA, a pesar de que fueron descontinuadas en 2024. Asimismo, se identifican propuestas que optan por aprovechar dispositivos más accesibles y disponibles como celulares inteligentes y tabletas con el fin de reducir la inversión requerida y/o incrementar el alcance de las aplicaciones a un mayor número de usuarios.

Es importante destacar en este punto que la RX se fundamenta en el desarrollo tecnológico, por ello, la evolución de los dispositivos que actúan como intermediarios en la creación de la experiencia inmersiva influye directamente en su alcance, funcionalidad y en el impacto que estas aplicaciones generan. En el caso particular de la RV, resulta especialmente relevante la evolución observada en las características de los visores.

Un primer ejemplo lo constituyen los Oculus Rift, empleados en estudios publicados entre 2017 y 2020, como lo muestra la Figura 6. Estos dispositivos, descontinuados en abril de 2021, funcionaban mediante conexión por cable a una computadora, por lo que su desempeño dependía directamente de la potencia de dicho equipo. El Oculus Quest puede considerarse el sucesor, ya que fue aplicado en investigaciones realizadas durante 2020 y 2022. A diferencia del modelo anterior, este dispositivo ya permitía funcionar en modo autónomo, sin la necesidad de conectarse a una computadora.

De manera similar, el “HTC vive” reportado en estudios del 2021 y 2024, es otro dispositivo que tampoco necesita cables, pero sí estaciones base de seguimiento. Usualmente 2 bases colocadas en las esquinas opuestas de la habitación que sirven para detectar los sensores del visor y mandos.

En la actualidad, muchos dispositivos de RX son autónomos, es decir, no necesitan mantenerse conectados físicamente, lo que se traduce en una mayor libertad de movimiento y mejor experiencia para el usuario, tal es el caso de los Meta Quest y la serie Focus de HTC vive. que ejemplifican la tendencia hacia soluciones inalámbricas, independientes e incluso cada vez más ligeras.

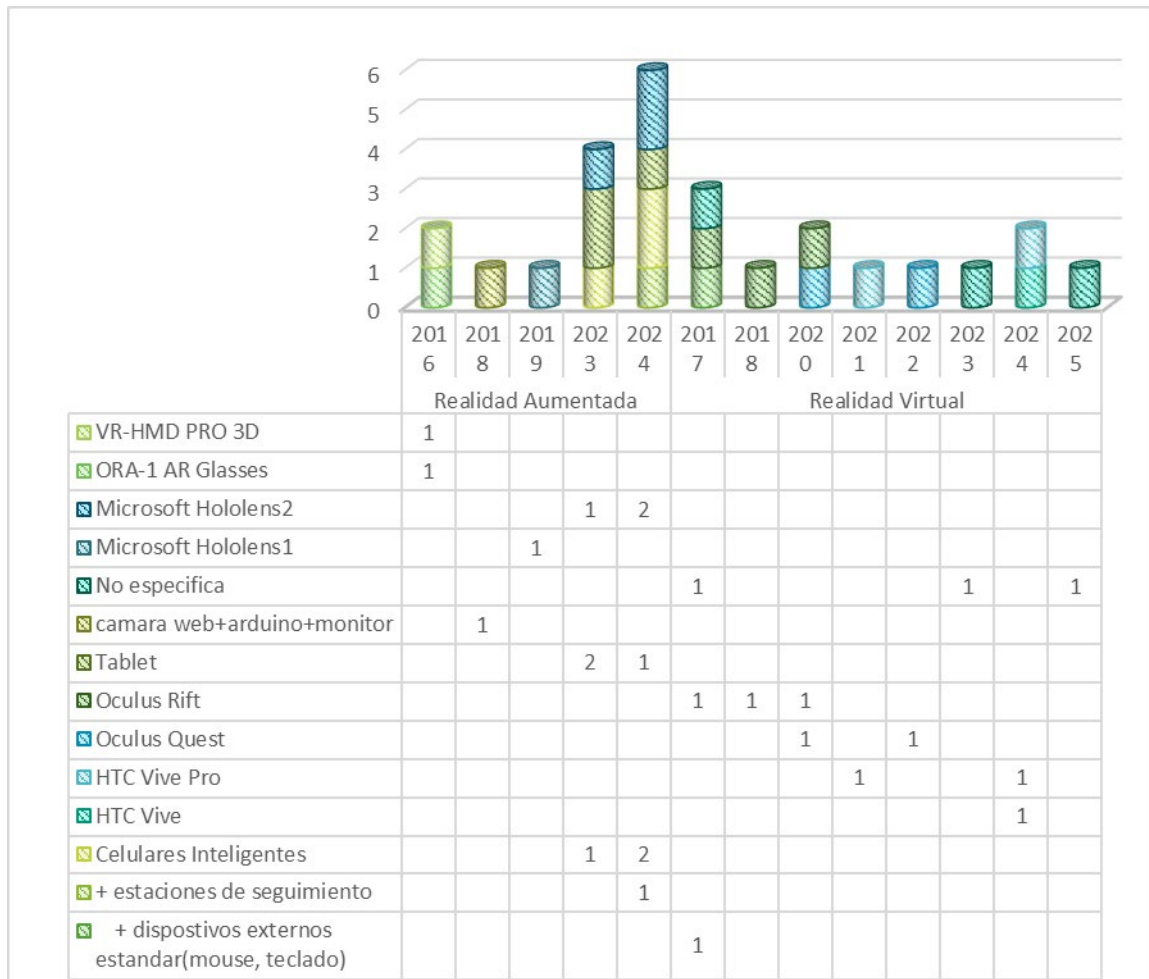


Figura 6. Dispositivos empleados para la experiencia virtual.

3.4 Centros de maquinado CNC empleados para el estudio y la virtualidad

Con el propósito de analizar la posible relación entre la complejidad de los centros de maquinado, tanto manuales como de control numérico CNC, y el tipo de experiencia de RX aplicada, se estableció la siguiente categorización numérica de los centros de maquinado, ordenada de menor a mayor según el alcance de los procesos productivos que permiten y su nivel de complejidad:

1. Centros de maquinado de operación manual
2. Centros de maquinado de control numérico por computadora compacto.
3. Centro de maquinado de control numérico por computadora tamaño estándar de 3 ejes
4. Centro de maquinado de control numérico por computadora de 5 ejes

Esta tipología permite comparar de manera sistemática cómo varía el grado de inmersión y virtualización conforme aumenta la complejidad del equipo. A partir de dicha clasificación se observa en la Figura 7 que, para los centros de maquinado de menor complejidad (1 y 2) se prefiere el uso de RA ya sea sola o con una maqueta física; en tanto que, en los centros de mayor complejidad (niveles 3 y 4) aplican la RV, incluyendo simulación por computadora o incluso diferentes variantes de RX dentro del mismo estudio.

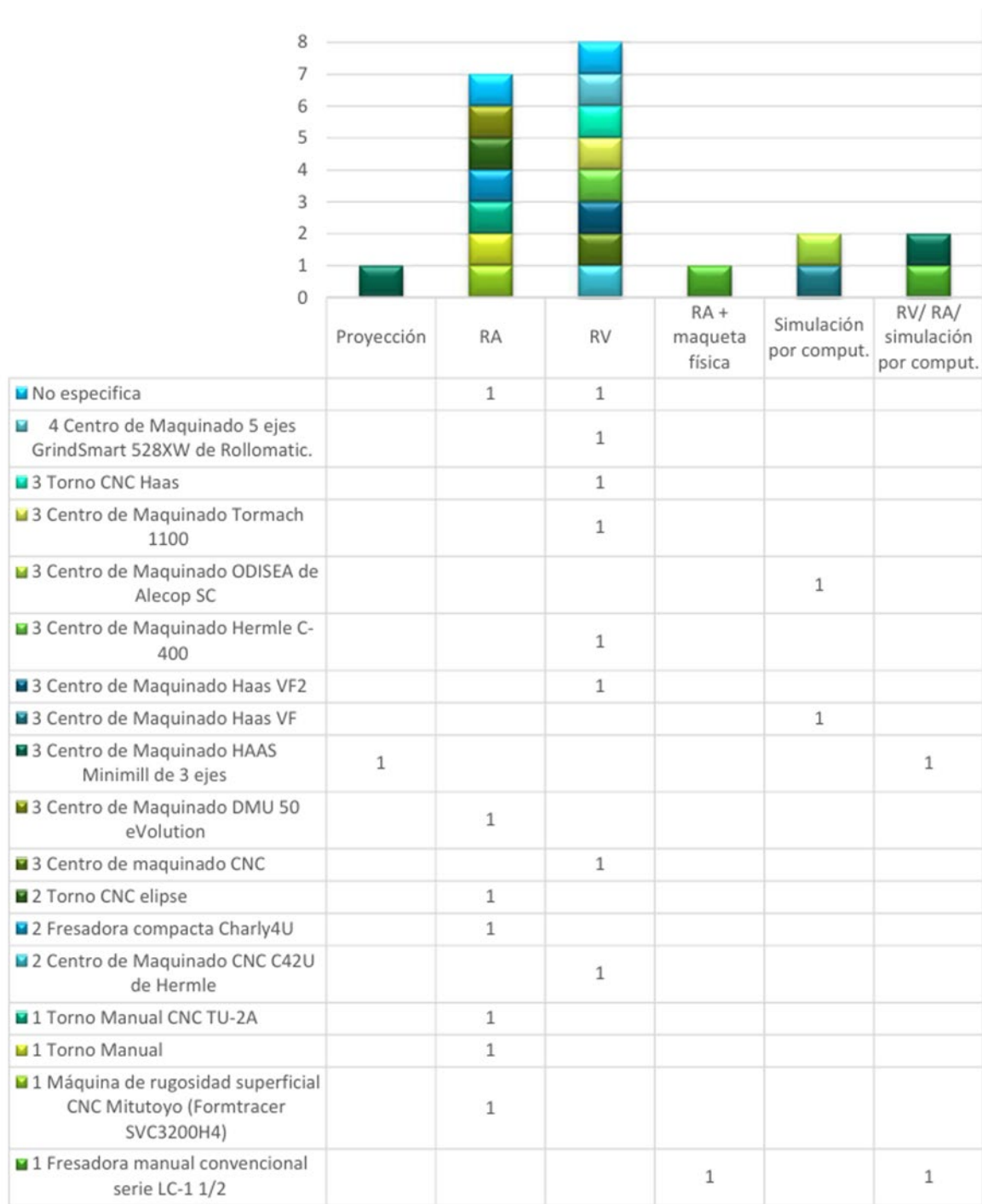


Figura 7. Centros de maquinado categorizados y la virtualidad aplicada

3.5 Reportes de investigación del uso de tecnologías RX en CNC en los últimos 10 años

A continuación, en la siguiente tabla se analizan las tareas aplicadas mediante el uso de las tecnologías RX en los centros de maquinados, los cuales se ordenan por año, y se muestra datos de autor, país y objetivo de la investigación, así como la actividad virtual principal implementada en el centro de maquinado, los parámetros que se evalúan, y un resumen de los resultados declarados en el estudio.

Tabla 1. Estudios en máquinas CNC con realidad extendida 2016-2025

AÑO	AUTOR	PAIS	OBJETIVO	ACTIVIDAD VIRTUAL PRINCIPAL	QUÉ EVALUAN	RESULTADOS
2016	Monroy Reyes et al.	México	Sistema de RA para torno manual. Solo un usuario a la vez.	Operaciones básicas en torno manual.	Aceptación y rendimiento.	Reportan que tuvo una recepción positiva por los usuarios.
2016	Nathanael et al.	Grecia	Analizar tareas cognitivas de mecánicos expertos y evaluar la efectividad de su propuesta.	Ajuste para la compensación en la longitud de la herramienta.	Finalización de la tarea, precisión y tiempo de ejecución.	Resultados positivos de aceptación en las 2 evaluaciones, pero no en precisión.
2017	Rogers et al.	EE. UU.	Probar impacto y evaluar el uso de VR en educación STEM en CNC torno y fresa.	Compararon curso diseñado presencial con curso virtual.	Percepción del equipo, la respuesta, habilidad de controlar el CNC, y la comodidad de los visores.	Incluir accesorios externos como el ratón dificultaba las tareas, los usuarios se desesperaban por combinar físico con virtual.
2017	Kao et al.	Taiwán	Aplicar RV en promoción y exhibición de máquinas CNC contrarrestando limitaciones por altos costos de transporte y espacio limitado.	Mostrar en feria el uso de una maquina CNC virtual con el fin de reducir costos de transporte.	Pruebas cualitativas, para medir la aceptación de usuarios en ferias de manufactura.	Resultados positivos, aunque observaron desafíos en la adaptación para personas mayores debido a problemas de visión.
2018	Kroupa et al.	Rep. Checa	Crear herramienta RV que ayude a los estudiantes a comprender mejor la construcción de máquinas herramienta.	Demostrativo. Mecanizado de piezas rotativas y prismáticas mediante tres tecnologías: fresado, torneado y taladrado.	No reportan pruebas para validar.	Recomiendan la descomposición de ensambles con propósito no educacionales, por ejemplo, verificar el diseño y construcción de mecanismos.
2018	Tzimas et al.	Francia	Presentar las instrucciones de configuración de máquinas herramienta mediante un dispositivo RA de bajo costo.	Mejorar la comunicación con los clientes y facilitar la promoción de máquinas herramienta.	No reportan pruebas para validar.	Respuesta inicial positiva de personal técnico profesional al que se le mostró la aplicación.
2019	Minoufèkr	Alemania	Asistir con	Representa la	No reportan	Presenta un

	et al.		simulación en el uso de máquinas CNC con AR mediante programación de cadena cinemática.	cadena cinemática de la CNC como un objeto gráfico en la programación.	pruebas para validar.	marco de trabajo usando Microsoft HoloLens y RA superponiendo instrucciones.
2020	Kesler et al.	Alemania	Aplicar RV a una fresadora CNC con la intención de evitar riesgos de seguridad y limitaciones logísticas.	Enseñar los procedimientos básicos de máquina CNC.	Usabilidad del sistema.	Buena usabilidad y un impacto positivo en su aprendizaje percibido.
2021	Hirt et al.	Suiza	Agregar la función inmersiva "caminar de verdad" en RV con la intención de permitir a los estudiantes obtener un rendimiento similar o mejor en comparación con la enseñanza tradicional.	Operar una máquina de rectificado con 4 tareas operativas básicas, encendido, iniciar ejecución de referencia, cambiar herramienta de desbaste y Apagado.	Eficiencia del aprendizaje y la retención de memoria a largo plazo.	Grupo entrenado virtualmente mostró un rendimiento ligeramente superior.
2021	Carretero et al.	España	Desarrollar metodología para tutoriales y cursos de formación en plataforma LMS para la preparación profesional en puestos industriales mediante simulación por computadora.	Metodología detallada para diseñar cursos.	Habilidades adquiridas por el estudiante en el entorno virtual.	Perciben un aumento en la confianza de los participantes en el uso de máquinas reales después de la capacitación virtual, lo que reduce los errores de uso y el tiempo para completar las tareas.
2022	Ryan et al.	EE. UU.	Configurar fresadoras CNC mediante RV, a partir de errores comunes para familiarizarse con el proceso, practicar la identificación de errores y desarrollar	Ajuste del cero y control del husillo. selección de accesorios, medición de la longitud de la herramienta, coordenadas de los ejes X e Y, y la puesta a cero del eje Z	Teoría de la Carga Cognitiva (CLT) de Sweller carga cognitiva (NASA-TLX). Tiempo en completar la tarea.	La retroalimentación de los usuarios sugiere que el entrenamiento en gestión de errores aumenta la confianza al enfrentar incertidumbre durante la

			estrategias de mitigación.			evaluación de la tarea.
2023	Hernández-Rodríguez & Guillén-y Parrea.	México	Desarrollar competencias con RA para una celda de manufactura que incluye un torno CNC.	Definir el cero de la máquina, la zona de mecanizado, el panel de control y 2 calibraciones. Video instructivo con procedimientos y operaciones manuales, y movimientos de la máquina.	Impacto en la motivación, el compromiso y la adquisición de competencias.	Buena aceptación, pero con comentarios que indican que la interacción con el instructor no es fácilmente reemplazable por la tecnología.
2023	Sorathiya et al.	India	Guiar a los operadores en el uso de una máquina CNC de rugosidad superficial mediante RA.	Preparación previa de la máquina. Asiste al operador en la ejecución del software de ejecución. Asistencia en mediciones de rugosidad superficial.	Evaluaciones objetivas (tiempo de finalización de tareas y precisión de las mediciones) y subjetivas (retroalimentación de los usuarios a través de un cuestionario).	Los usuarios novatos pudieron completar la tarea en un tiempo promedio similar al de los usuarios experimentados y con mínima desviación en los valores medidos.
2023	T. J. Chuang et al.	Taiwán	Integrar retroalimentación háptica realista en un entorno de RM combinando RA con una maqueta física de la mesa de fresado para capacitación.	Operaciones de fresado manual convencional.	Usabilidad, inmersión del simulador, cuestionario de presencia, tiempo de mecanizado.	Reportan que la retroalimentación háptica realista aumenta la usabilidad, el realismo, la inmersión y la presencia.
2023	Paszkiewicz et al.	Polonia	Simula la fabricación de un tren de aterrizaje de un avión en un entorno de RV a partir del proceso tecnológico de preparación de operaciones de una máquina numérica CNC.	Comparan 4 formas de capacitación: (1) Máquina CNC física, (2) Simulador físico, (3) Simulador de software, (4) El entorno de realidad desarrollado.	Parámetros definidos basados en su experiencia propia y evaluados como bajo-medio-alto.	Reportan resultados que indican que entrenamiento frente a máquina física y RV son los más adecuados para personal de ingeniería en la industria aeroespacial. El entorno RV recibió mayor calificación de soporte y comodidad en el entrenamiento.

2023	Liu et al.	China	Mejorar las habilidades profesionales y capacidad práctica de los estudiantes de ingeniería, la estructura mecánica, composición, funcionamiento y procesos operativos de las máquinas herramienta CNC.	Integra módulos de estructura de la máquina, operación y procesamiento, permitiendo a los estudiantes comprender la composición, practicar la operación y simular el mecanizado de piezas complejas.	Solo muestran simulación virtual de máquinas herramienta CNC, utilizando SolidWorks como plataforma base y tomando un centro de mecanizado vertical como objeto de estudio.	El sistema de simulación virtual ayuda a los estudiantes a comprender de manera vívida y real la estructura mecánica, composición, operación y procesos de mecanizado de las máquinas herramienta CNC.
2024	Ibarra Kwick et al.	México	Presentar una revisión sistemática de la literatura científica publicada del 2011 al 2024 con uso de RX para el entrenamiento en máquinas de control numérico CNC. Y describir el desarrollo en curso de un prototipo de aplicación RV.	El montaje de herramientas, la colocación de la pieza de trabajo y arranque de la máquina.	No reportan pruebas para validar.	Asegura que el uso de XR puede mejorar las habilidades espaciales y psicomotoras, la capacidad de toma de decisiones en tiempo real y ayudar a gestionar la carga cognitiva de los operarios.
2024	Aruanno et al.	Italia	Herramienta de RA como apoyo para estudiantes con necesidades especiales a trabajar e interactuar con la máquina de forma segura.	Actividades de manejo principales para la fresadora de escritorio CNC Charly4U que ayude a los estudiantes con necesidades especiales.	Usabilidad.	Encuentran la versión de escritorio con menor aceptación, pero las 3 aceptables. Observaciones propias de los usuarios, como impacto negativo en la puntuación hacia el campo de visión limitado (FoV).
2024	Prasetya et al.	Nigeria	Simular con RA proceso de mecanizado, facilitando comprensión y adquisición de habilidades prácticas en los	Aplicación con simulaciones de animación de objetos 3D y visualización de principios funcionales de los ejes X y Z en torno	Funcionalidad para validar la efectividad de la aplicación.	Mediante pruebas de "caja negra" para validar la funcionalidad de la aplicación, demuestran cumplir con sus

			estudiantes.	CNC de 2 ejes.		objetivos y expectativas iniciales.
2024	T.-J. Chuang & Smith.	Taiwán	Propone y desarrolla un laboratorio virtual práctico, multiusuario y multiplataforma dentro del Metaverso.	Sesión de demostración práctica grupal como se debe realizar y después cada uno se va a su propia máquina virtual para realizar la práctica.	Nivel de presencia y usabilidad comparan cada una de las aplicaciones (RV/ RA/ simulación por computadora).	VIVE Pro: Fue la plataforma con los niveles más altos de implicación, presencia y usabilidad. Le sigue la simulación por computadora, y el uso de celulares inteligentes.
2025	Kaarlela & Outeiro.	EE. UU.	Permitir a los usuarios interactuar con un gemelo digital en tiempo real mediante un concepto de máquina-herramienta ciberfísica para la educación.	Teleoperación y monitoreo de la máquina herramienta CNC, Controlar la posición del panel de control, proceso de mecanizado, movimiento de la máquina, dirección de rotación del husillo, funciones de encendido/apagado del refrigerante, remoción de la cubierta de la máquina.	No reportan pruebas para validar.	Reconocen la limitación actual de la ausencia de retroalimentación háptica y la simulación de vibraciones, formación de virutas y dinámica del refrigerante, las cuales se identifican como elementos necesarios para una réplica más realista de un entorno físico.

3.6 Análisis de las pruebas experimentales para la validación de los estudios en centros de maquinado con RX

En los primeros reportes de la década, se encuentran cuestionarios cualitativos no estandarizados desarrollados por los mismos investigadores: (Monroy Reyes et al., 2016), aplica el suyo con 8 preguntas destinadas cada una de ellas a evaluar los niveles de satisfacción, precisión, entendimiento, explicación, atractivo, interfaz, velocidad y el sistema de marcadores mediante una escala de Likert con valores muy malo, malo, regular, bueno y muy bueno. Al igual que (Nathanael et al., 2016) quien diseña un cuestionario a usuarios evaluando la percepción de las instrucciones, la ayuda del sonido y la aparición de una chispa o brillo al tocar la herramienta de corte, el tablero de control, la seguridad para realizar la actividad correctamente la siguiente vez. Este cuestionario fue aplicado después de la actividad virtual y posteriormente después de la actividad frente a máquina real.

Por su parte, (Rogers et al., 2017), evalúa con su propio cuestionario de usabilidad mediante preguntas enfocadas en conocer la percepción de los usuarios al moverse en el ambiente virtual, la legibilidad de los textos, la habilidad de controlar el CNC, el entendimiento de las instrucciones, el realismo, la facilidad de uso, experiencia previa en CNC; con una escala Likert fuertemente en desacuerdo, en desacuerdo, de acuerdo y fuertemente de acuerdo. Reporta que algunos participantes indicaron sentir náuseas.

En su investigación, (Hernández-Rodríguez & Guillén-Yparrea, 2023) desarrollan su propio cuestionario para conocer aspectos relacionados con los módulos de aprendizaje y el módulo de RA

con una escala de Likert fuertemente desacuerdo, desacuerdo, ni acuerdo ni desacuerdo, acuerdo y fuertemente de acuerdo.

Mientras que (Sorathiya et al., 2023) aplicaron también su propio cuestionario con 5 reactivos para conocer la percepción de los usuarios en la RA, recabando información relacionada con la facilidad de uso de la herramienta, la utilidad, disfrutar la experiencia, la percepción general y su recomendación de módulos similares para otras máquinas, evaluados en rangos de 1 a 5.

Sin, embargo hay autores que aplican métricos desarrollados, aplicados y probados previamente para aplicaciones y experiencias en RV y RA, como es el caso de (Hirt et al., 2021), que incluye el cuestionario de mareo por simulador en RV - SSQ (por sus siglas en inglés “*Simulator Sickness Questionnaire*”), por otra parte, (Kennedy et al., 1993), sintetiza 16 síntomas relacionados por el uso de cascos de RV, agrupados en 3 dimensiones: oculomotor, desorientación y náuseas a través de una escala de Likert de 4 niveles: ausente, leve, moderado y grave. También aplica la escala multidimensional de Carga mental NASA TLX al realizar una tarea de trabajo que evalúa en un rango de bajo a alto los parámetros demanda mental, demanda física, demanda temporal, esfuerzo, desempeño y nivel de frustración (Hart, 2006).

Al siguiente año, (Ryan et al., 2022) al desarrollar su propuesta de entrenamiento basada en los errores, enfatizan la importancia de la aplicación del cuestionario que evalúe la carga cognitiva debido a la complejidad en el uso de maquinados de control numérico, por lo que también aplica NASA TLX.

Ese mismo año, (Kesler et al., 2020) aplica en su estudio la escala de usabilidad del sistema SUS (por sus siglas en inglés “*System Usability Scale*”) desarrollada por (Brooke, 1995) con el propósito de medir la eficacia, capacidad de los usuarios para completar tareas utilizando el sistema y la calidad del resultado de esas tareas; la eficiencia, nivel de recursos consumidos en la realización de las tareas; y la satisfacción, reacciones subjetivas de los usuarios al utilizar el sistema. Mediante 10 reactivos evaluados en escala Likert del 1 al 5. Esta evaluación también la aplica posteriormente (Aruanno et al., 2024), (T. J. Chuang et al., 2023) y (T.-J. Chuang & Smith, 2024), quienes además del SUS, aplica el cuestionario de presencia PQ (por sus siglas en inglés “*Presence Questionnaire*”) que consta de 20 reactivos evaluados en 7 puntos de escala Likert, a partir de la definición de presencia como la experiencia subjetiva de estar en un lugar o entorno, incluso cuando uno está situado físicamente en otro.

Por su parte, (Paszkievicz et al., 2023) prefiere aplicar el NPS (*Net promoter score*), métrica que mide la lealtad del cliente y su disposición a recomendar una empresa, producto o servicio a otros, mientras que (Prasetya et al., 2024) aplica una prueba de caja negra centrándose en la funcionalidad de las características dentro de la unidad de entrenamiento teniendo como objetivo verificar el estado ideal de la aplicación y determinar la idoneidad de las funciones (Sendari et al., 2020). La prueba de caja negra consiste en evaluar la funcionalidad del sistema en cada actividad que ocurre en la aplicación, centrándose únicamente en las entradas y salidas. Se colocan en una tabla cada uno de los pasos a realizar en la experiencia de RA como entradas esperadas o inesperadas, se determina un parámetro de cumplimiento bilateral (detectado/no detectado o satisfactorio/no satisfactorio) que hacen la función de salidas, de tal manera que el evaluador actúa como un usuario final, interactuando con la interfaz de usuario o enviando datos al sistema a cada interacción en el proceso para determinar si debe ser modificado.

A partir del análisis de las investigaciones se presentan en la Tabla 2 los métricos cualitativos aplicados:

Tabla 2. Mediciones cualitativas en máquinas de CNC.

	CUALITATIVOS
Cuestionario propio	4
Escala para medir la facilidad de uso del sistema (SUS)	5
Carga cognitiva de trabajo (NASA-TLX)	2
Cuestionario de presencia (PQ)	2

Cuestionario demográfico	1
Cuestionario mareo por simulador RV (SSQ)	1
Net Promoter Score (NPS) mide la experiencia del cliente	1
Pruebas de funcionalidad (prueba de caja negra) que validan la efectividad de la aplicación	1
Total general.	17

Como refleja la tabla 2, la evaluación de las aplicaciones de RX para el entrenamiento en centros de maquinado CNC ha evolucionado desde el uso de cuestionarios propios hacia una adopción creciente de herramientas estandarizadas que miden aspectos clave como la usabilidad del sistema, la presencia en el entorno virtual, la carga cognitiva y el bienestar del usuario, complementándose con evaluaciones funcionales para asegurar la efectividad y calidad de estas soluciones tecnológicas.

Respecto a las mediciones cuantitativas, (Nathanael et al., 2016), en el inicio de la década, enfocaban sus mediciones en la cantidad ensayos exitosos, repetición de ejercicio, precisión de compensación lograda (μm) y tiempo de finalización de la tarea. Este último parámetro es de los más utilizados también por (Hirt et al., 2021), (Carretero et al., 2021), (Ryan et al., 2022), (Sorathiya et al., 2023), (T. J. Chuang et al., 2023), (Paszkievicz et al., 2023) y (T.-J. Chuang & Smith, 2024).

La repetición del ejercicio, como la segunda medida más utilizada, también es incluida en su reporte por (Carretero et al., 2021), y (Paszkievicz et al., 2023). Y la cantidad de errores la miden (Hirt et al., 2021) y (Carretero et al., 2021).

Por su parte, (Paszkievicz et al., 2023) miden la automatización de la tarea/actividad en la aplicación virtual propuesta, el costo de la implementación y el costo unitario del ejercicio. En tanto que (Sorathiya et al., 2023), incluyen la precisión en las mediciones en la actividad. La síntesis de las mediciones cuantitativas aplicadas se muestra en la siguiente Tabla 3.

Tabla 3. Mediciones cuantitativas en máquinas CNC

	CUANTITATIVOS
Automatización de evaluación (calificación)	1
Costo de implementación	1
Costo unitario del ejercicio	1
Cantidad de ensayos exitosos	1
Precisión de compensación lograda (μm).	1
Precisión de las mediciones	1
Cantidad de errores	2
Repetición de ejercicio	3
Tiempo de finalización de la tarea	8
Total general	19

En resumen, las mediciones cuantitativas en la investigación de RX para CNC, como lo sintetiza la Tabla 3, aunque han evolucionado desde un enfoque inicial en la eficiencia y el éxito de la tarea, hacia una evaluación más holística que incorpora la precisión, el análisis de errores y, más recientemente, consideraciones económicas y de automatización. En su mayoría está presente la medición del tiempo de ejecución para realizar la actividad como un factor determinante para evaluar la aplicación.

En la Figura 8 se muestran por año y por tipo de virtualidad, la cantidad de evaluaciones cuantitativas y cualitativas aplicadas en los centros de maquinados de control numérico.

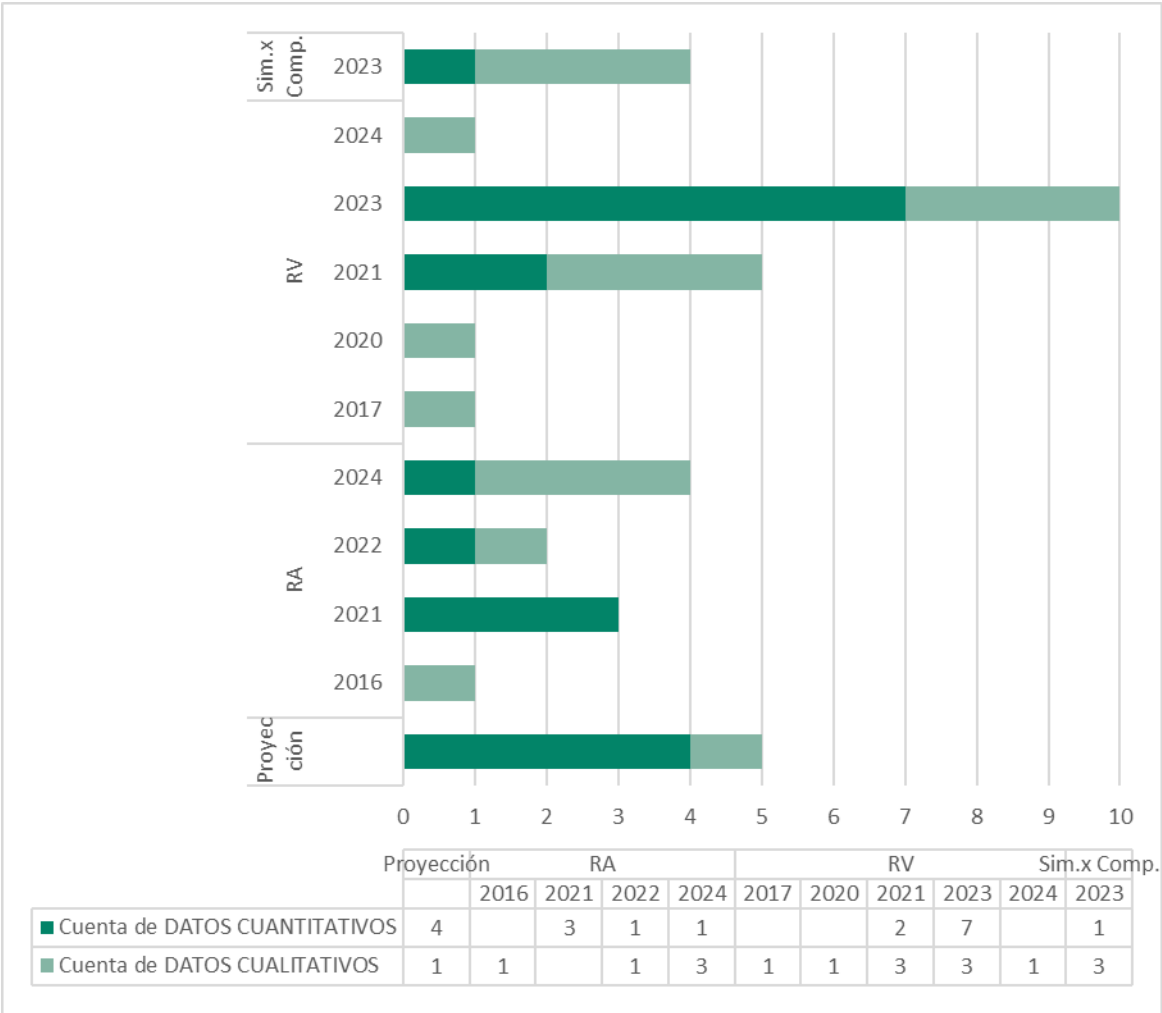


Figura 8. Evaluaciones cuantitativas y cualitativas por año y experiencia virtual.

3.7 Tamaño de las muestras

En la Tabla 4, se evidencian los tamaños de las muestras consideradas para el análisis realizado en cada estudio. Por ejemplo, de los 21 artículos comprendidos en este estudio, 7 de ellos no reportan o no realizan un análisis estadístico de su propuesta, lo que sugiere una falta de uniformidad en el rigor metodológico para validar las propuestas en el campo. En los 14 restantes, el tamaño de la muestra varía desde 9 participantes (Carretero et al., 2021), hasta un máximo de 60 (Prasetya et al., 2024). El perfil de los usuarios más común son estudiantes de las áreas de ingeniería. En algunos casos, especifican que no tenían conocimientos previos del uso de la máquina de control numérico. En otras investigaciones hacen la comparación contra los experimentados, lo que permite analizar el impacto positivo de la RX en diferentes niveles de habilidad. Respecto al género, solo 6 artículos mencionan el numero específico para cada uno, y según los datos, el porcentaje de aprendices femeninos tiene una proporción de 5% a 30% del total de la muestra, por lo que resulta siempre más bajo respecto a los aprendices masculinos. Esta baja representación femenina subraya la necesidad de considerar estrategias para fomentar una mayor inclusión de género en la investigación y el desarrollo de tecnologías de entrenamiento en el ámbito de la ingeniería y la manufactura.

Tabla 4. Tamaños de muestra por autor, año y perfil de participantes

AUTOR /AÑO	PARTICIPANTES		MUESTRA	H	M
------------	---------------	--	---------	---	---

(Nathanael et al., 2010)	Estudiantes de ingeniería mecánica	29	20	9
(Rogers et al., 2017)	Grupo de control 22 y grupo de prueba 21	43		
(Kesler et al., 2020)	Estudiantes	24	20	4
(Hirt et al., 2021)	Grupo de control y prueba. 10 RV + 9 Tradicional, edad 28±5	19	18	1
(Carretero et al., 2021)	5 usuarios con diferentes roles (1 experto. 2 instructores y 2 aprendices) usuarios internos de la empresa involucrados en procesos de fabricación.	9		
(Hernández-Rodríguez & Guillén-Yparrea, 2023a)	Estudiantes 6o semestre de ingeniería mecatrónica e ingeniería industrial	55		
(Sorathiya et al., 2023)	Usuarios experimentados con conocimiento previo de la máquina y un número igual de usuarios principiantes sin conocimientos operativos	10	39	16
(T. J. Chuang et al., 2023)	Ninguno de los participantes era operador profesional de fresadoras manuales. Todos tenían menos de un año de experiencia en operaciones de fresado. Rango de edad 20-30 años y no	31		
(Paszkievicz et al., 2023)	Ingenieros	25	22	9
(Aruanno et al., 2024)	Estudiantes con necesidades especiales de la universidad ASPOC	13	22	3
(Prasetya et al., 2024)	Estudiantes de ingeniería mecánica	60		
(T.-J. Chuang & Smith, 2024)	13 usuarios para HTC VIVE Pro 13 usuarios para Microsoft HoloLens 2 13 usuarios para PC 13 usuarios para teléfonos inteligentes Android	52		

4. Discusión

A partir del análisis realizado y en respuesta a las preguntas formuladas al inicio, se puede observar que las aplicaciones con RX para el entrenamiento en centros de maquinado CNC, ha mostrado un crecimiento sostenido durante los últimos diez años. Estos desarrollos se han realizado en diferentes partes del mundo tales como EE. UU., Taiwán, México, Francia, Suiza, Polonia, entre otros. En general, los estudios reportan resultados positivos en la implementación de estas tecnologías; si bien en algunos casos los análisis comparativos entre distintas aplicaciones de RX muestran diferencias mínimas en los resultados de aprendizaje evaluados, la aceptación por parte de los usuarios y el desempeño asociado al uso de la RV o RA tiende a ser predominante. El correcto manejo de estas máquinas necesita de personal debidamente capacitado. La falta de pericia en su manipulación puede llevar a retrasos, desperdicios y pérdidas significativas. Asimismo, al tratarse de una alternativa que permite la repetición controlada de las prácticas para el desarrollo de habilidades, la RX se consolida como una solución viable, reflejada en los objetivos planteados y resultados reportados por las

investigaciones realizadas a lo largo de la última década.

Respondiendo a la pregunta 2, relacionada con los softwares de desarrollo, dentro del proceso de virtualización como parte inicial para RX, el más empleado que se reporta pertenece a Dassault Systèmes, muy probablemente por el acceso con el que se cuenta en el ámbito de ingeniería y maquinado. La siguiente etapa que consiste en programar la interacción de RV o RA, el favorito es y ha sido Unity 3D, software libre que resulta no muy sencillo para realizar las modelaciones, pero que permite la importación de dichas modelaciones y la programación para interacción en entornos virtuales, con la ventaja de que, su aceptación e implementación ha sido tal, que existen kits de desarrollo de software de diferentes aplicaciones y dispositivos que se le integran y facilitan el desarrollo de las experiencias de RX.

La pregunta 3 cuestiona acerca de la tecnología utilizada dentro del proceso de virtualización, como parte inicial para RX. Al respecto, la RA se ve presente como una solución que permite la visualización de instrucciones de manera superpuesta. Para ello, se han desarrollado alternativas con el uso de celulares o tabletas inteligentes, aparatos que prácticamente todo el mundo tiene y que, sus características internas permiten aplicar RA al estar provistos de cámaras, giroscopio y capacidad de procesamiento. Algunos autores resumen su aplicación a la visualización demostrativa en pantalla del proceso (Carretero et al., 2021), (Hernández-Rodríguez & Guillén-Yparrea, 2023a), (Liu et al., 2023) y (Aruanno et al., 2024), probablemente por dificultades en el uso, ya que deben estar manipulándolo al mismo tiempo el dispositivo y el centro de maquinado.

En los primeros años de la década, dispositivos preferidos para un entrenamiento instruccional han sido los Microsoft Hololens en sus versiones 1 y 2, dispositivos montados en la cabeza que permiten la libertad de las manos e incluso su operación mediante gestos manuales o voz. Sin embargo, se dejaron de fabricar en 2019. Actualmente se encuentran otras marcas con avance tecnológico exclusivos de RA que permiten integrar desarrollos, tales como los Magic Leap 2, o el próximo a liberarse, Android XR de Google. Sin embargo, la tendencia en dispositivos de uso exclusivo para RA, con un enfoque hacia la comodidad para el usuario, tiene como objetivo minimizar el tamaño y aligerar el peso en una presentación similar a unos lentes convencionales. Al respecto, ya se muestran algunos productos en esa línea como las Snap Spectacles 5.

Y en relación con los dispositivos de RV, es notorio el intento de avance en nivel de inmersión, como lo reportan (Rogers et al., 2017) al combinar Oculus Rift con dispositivos externos estándar ratón y teclado; así como posteriormente al incluir 2 controladores y 4 faros conectados para el seguimiento, además de que el usuario llevaba una computadora portátil montada en la mochila. Al respecto, una buena noticia es que los visores actuales han mejorado mucho esas características (Hirt et al., 2021). En cuanto a modelos de dispositivos RX preferidos, la revisión muestra que hasta el 2025 han sido los desarrollados por Meta, en su evolución de nombres y modelos comerciales, por lo que lo reportan en las investigaciones bajo el nombre Oculus, pero éste cambió de nombre a Meta al ser adquirido por Facebook, siendo el dispositivo actual en el mercado Meta Quest 3 y 3s. Otra marca muy utilizada en las investigaciones son los HTC Vive. En ambos casos, los modelos recientes de estas marcas permiten cierta autonomía al ser inalámbricos, un campo de visión más amplio y un menor peso que sus predecesores, así como la implementación de tecnología mejorada que permiten una inmersión más profunda, por lo que representan una mejor solución. En el mercado actual, también se encuentran los lentes de Apple, Vision pro, pero no se registró ningún reporte que los aplicara y/o evaluara; probablemente porque representa una mayor inversión que las otras marcas. Una característica de todos estos visores mencionados es que pueden funcionar para RA y RV, lo que representa una opción para aquellas investigaciones donde se requiere evaluar diferentes aplicaciones de RX con el fin de determinar y validar su eficiencia.

Algunos autores marcan la importancia de la retroalimentación táctil e incluir retroalimentación de los sentidos. Esto se ve reflejado en las investigaciones que involucran maquetas físicas (T. J. Chuang et al., 2023). En un estudio más reciente, (Kaarlela & Outeiro, 2025) reconocen la limitante actual de la ausencia de retroalimentación háptica y simulación de vibraciones, formación de virutas y dinámica del refrigerante, las cuales identifican elementos necesarios para una réplica más realista de un entorno físico. Por la parte háptica, actualmente los controladores de los dispositivos de RX permiten sensaciones al tacto de peso, tamaño y forma. Además, existen guantes especializados a

través de los cuales incluso se puede percibir presión vibración, textura. Algunos modelos son Sense Glove Nova, HaptX, que ofrecen SDK para el desarrollo de aplicaciones en Unity; sin embargo, la tecnología en esta área aún se encuentra en una etapa de desarrollo, por lo que resulta una inversión alta.

Para responder a la pregunta 3, se analizaron los centros de maquinado por nivel de complejidad en relación con la RX aplicada como medio de entrenamiento, y se encontró que los centros de maquinados manuales, de escritorio o compactos emplean la RA, mientras que los más grandes y complejos en tamaño, o de 3 a 5 ejes, aplican la RV como medio para el entrenamiento. Aun cuando varios autores comparan los entrenamientos con diferentes virtualidades o incluso frente a máquina, determinan una evaluación específica para cada una de esas variantes y ninguno contempla un entrenamiento mezclado que involucre diferentes aplicaciones de RX asegurando la adquisición de habilidades.

Respecto a la pregunta 4, los procesos incluidos en las experiencias de RX van, desde fines demostrativos en exposiciones de manufactura sobre el funcionamiento de una máquina de control numérico y evitar los costos de transporte, hasta la parte más operativa como la preparación de las máquinas, ajuste del cero pieza, control de la herramienta de corte, configuración mediante el tablero de control y arranque de la máquina. No se encontró un reporte que indique una enseñanza integral de todo el proceso, excepto la de EE.UU. (Kaarlela & Outeiro, 2025), que describen mediante operación a distancia y monitoreo con un instructor, pero no reporta métricos que validen su desarrollo.

Por otro lado, y respondiendo a la pregunta 5, para validar los desarrollos se han realizado diferentes pruebas experimentales cuantitativas, destacando cantidad de errores, costo de implementación, costo unitario del ejercicio, cantidad de ensayos exitosos, precisión de las mediciones, repetición de ejercicio y tiempo de finalización de la tarea, así como análisis comparativos entre las variantes de entrenamiento. Sin embargo. No se identificó ningún estudio que documente y analice de manera integral todas estas variables dentro de una misma investigación.

Por otro lado, se han reportado trastornos en algunas personas por el uso de la tecnología de RV, tales como el cibermareo (Aruanno et al., 2024), (Paszkievicz et al., 2023), o la cinetosis, también conocida como “enfermedad del movimiento” y que son los síntomas de mareos y náuseas que experimentan algunas personas cuando un vehículo está en movimiento (Invencio-Da-Costa et al., 2023), actualmente está asociado a la exposición a realidades virtuales. A pesar de ello, son pocos los estudios que mencionan el tiempo de exposición de los ejercicios en aras de evitar estos efectos. Una herramienta para evaluar este efecto es el SSQ cuestionario mareo por simulador RV (Kennedy et al., 1993). Una medición imprescindible para cuidar el bienestar de los usuarios.

Las mediciones cualitativas más referenciadas son la usabilidad del sistema SUS, carga cognitiva NASA TLX y el cuestionario de presencia PQ. Por lo que, si se ha de desarrollar alguna aplicación de RX será importante realizar estas mediciones como mínimo. No se encuentran muchos datos y análisis de estudios respecto al aprendizaje personalizado por género.

Respecto al desarrollo de las experiencias virtuales, se observan desde el inicio de la década los intentos de combinación multisensorial, aunque con resultados no muy favorables, ya que consistía en una combinación de hardware convencional (ratón y teclado) con RV y reportan que generaba confusión en los usuarios (Rogers et al., 2017). En este sentido, el desarrollo tecnológico resulta un factor determinante para la efectividad de las aplicaciones de RX. Esta influencia se refleja, por ejemplo, en el estudio de (Kao et al., 2017), quienes señalan que las personas de mayor edad reportan dificultades visuales al interactuar con este tipo de tecnologías. Asimismo, (T. J. Chuang et al., 2023) destacan que la incorporación de retroalimentación háptica incrementa la usabilidad, el nivel de inmersión y la sensación de presencia del usuario. En respuesta a estos hallazgos, los dispositivos actuales integran cada vez más periféricos que incorporan el sentido del tacto, enriqueciendo la experiencia inmersiva.

5. Conclusiones

Los resultados de este estudio permiten concluir que la aplicación de experiencias formativas

mediante Realidad Extendida, en centros de maquinado de control numérico CNC representa una alternativa viable y efectiva frente a las limitaciones actuales de acceso, costo y riesgo inherentes a la capacitación presencial con maquinaria real. La tecnología RX ha demostrado ser capaz de ofrecer entornos controlados y seguros, favoreciendo el desarrollo de habilidades operativas sin comprometer la integridad de los equipos ni la seguridad de los usuarios.

Asimismo, se identifica que, en la última década, diversas investigaciones han abordado esta aplicación desde enfoques diversos, proporcionando una base conceptual sólida que puede servir como punto de partida para futuros desarrollos. Sin embargo, resulta indispensable considerar la constante evolución tecnológica, que abre nuevas oportunidades para enriquecer las experiencias de usuario y optimizar los procesos de enseñanza-aprendizaje.

Un señalamiento importante en más de una investigación es que el entrenamiento por RX no sustituye un entrenamiento frente a máquina. Sería importante considerar las diferentes tecnologías de RX en diferentes etapas de la adquisición de habilidades para el manejo de estas máquinas. Por ejemplo, en una etapa inicial es necesario realizar el entrenamiento mediante RV, para aprender la operatividad eficiente y evitar desperdicios y daños, sin necesidad de contar con una máquina física. Cuando el proceso y manejo de la máquina ya esté más asimilado e incluso se pueda tener acceso a una máquina física, entonces aplicar la RA o RM, y terminar con una fase de entrenamiento final frente a máquina. En particular, la incorporación de sistemas multisentidos, como la retroalimentación háptica, la simulación de peso, efectos sonoros y estímulos olfativos podría incrementar significativamente la inmersión y realismo de las simulaciones, favoreciendo una transferencia más eficiente de las competencias adquiridas al entorno físico. De igual forma, la integración de tecnologías emergentes, tales como el Internet de las Cosas y la inteligencia artificial, se perfila como una vía prometedora para personalizar los entrenamientos, adaptarlos al ritmo y perfil de cada usuario, y aumentar su eficacia.

Finalmente, se reconoce la necesidad de ampliar las investigaciones en este campo, particularmente en lo referente al entrenamiento en centros de maquinado CNC, dado que su aplicación sigue siendo limitada en comparación con otros sectores industriales y educativos. El avance en esta línea permitirá no solo mejorar la formación de operarios e ingenieros, sino también contribuir a una mayor seguridad, eficiencia y competitividad en la industria manufacturera.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses en relación con este manuscrito.

Contribución de autores

(Esta sección es obligatoria)

Referencias

- Arnaldi, Bruno & Guitton, Pascal & Moreau, Guillaume. (2018). Virtual Reality and Augmented Reality. *Virtual Reality and Augmented Reality: Myths and Realities*. 10.1002/9781119341031.
- Aruanno, B., Carruba, M. C., Mondellini, M., Santos-Paz, J. A., Ferrise, F., Karaki, J., & Covarrubias, M. (2024). Enhancing Inclusive Education for Young Students with Special Needs through Mixed Reality: Exploring the Potential of CNC Milling Machine Application. *Computer-Aided Design and Applications*, 21(3). <https://doi.org/10.14733/cadaps.2024.522-535>
- Brooke, J. (1995). SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*, 189, 11–30.
- Carretero, M. del P., García, S., Moreno, A., Alcain, N., & Elorza, I. (2021). Methodology to create virtual reality assisted training courses within the Industry 4.0 vision. *Multimedia Tools and Applications*, 80(19). <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11195-2>
- Chuang, T. J., Tsai, Y. Y., & Smith, S. (2023). A visuo-haptic mixed reality manual milling training simulator. *Virtual Reality*, 27(3), 2417–2430. <https://doi.org/10.1007/s10055-023-00816-w>
- Chuang, T.-J., & Smith, S. (2024). A Multi-user Cross-platform hands-on virtual lab within the Metaverse – the case of machining training. *Virtual Reality*, 28(1), 62. <https://doi.org/10.1007/s10055-024-00974-5>

- De Giorgio, A., Monetti, F. M., Maffei, A., Romero, M., & Wang, L. (2023). Adopting extended reality? A systematic review of manufacturing training and teaching applications. *Journal of Manufacturing Systems* (71). <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.10.016>
- Edalati, S., Spector, B., Nathan, R., Vasan, V., Rosenberg, J., & Gray, M.L. (2025) Exploring extended reality as a therapy for patients with facial paralysis: A scoping review. *American Journal of Otolaryngology*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.amjoto.2024.104562>.
- Fung Wong, I.Y. & Ling Leung, L. Y. (2025). Explore the extended impacts on psychological well-being in older adults through application of virtual reality technology: An integrative review. *International Journal of Nursing Studies Advances*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.ijnsa.2025.100371>.
- Gatto, C., Barba, M.C., Chiarello, S., Corchia, L., Faggiano, F., Nuzzo, B. L., Sumerano, G., DeLuca, V. & De paolis, L.T. (2025) Breaking the barriers: Extended reality and innovative technologies for enhanced accessibility of the Ceramics Museum of Cutrofiano. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2025.e00400>.
- Google. (2025). Overview of Google Cardboard. <https://support.google.com/cardboard/manufacturers/answer/6321454>
- Grabowski, A. (2021). *Virtual reality and virtual environments: A tool for improving occupational safety and health*. Taylor & Francis Group.
- Hart, S. G. (2006). Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(9), 904–908. <https://doi.org/10.1177/154193120605000909>
- Hernández-Rodríguez, F., & Guillén-Yparrea, N. (2023b). Competencies Development Strategy Using Augmented Reality for Self-Management of Learning in Manufacturing Laboratories (AR-ManufacturingLab). *Heliyon*, 9(11), e22072. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22072>
- Hirt, C., Spahni, M., Kompis, Y., Jetter, D., & Kunz, A. (2021). Virtual reality training platform for a computer numerically controlled grinding machine tool. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 14(1). <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2021.115460>
- Ibarra Kwick, J. M., Hernández-Urbe, Ó., Cárdenas-Robledo, L. A., & Luque-Morales, R. A. (2024). Extended Reality Applications for CNC Machine Training: A Systematic Review. *Multimodal Technologies and Interaction*, 8(9), 80. <https://doi.org/10.3390/mti8090080>
- Invencio-Da-Costa, L. F., Sánchez-Blanco, C., Yáñez-González, R., Sánchez-Gómez, H., Peña-Navarro, P., Pacheco-López, S., Marcos-Alonso, S., Almeida-Ayerve, C. N., Cabrera-Pérez, L., & Díaz-Sánchez, V. (2023). Mareo y vértigo ortostático, funcional y cinetosis. *Revista ORL*, 15(3), e31540. <https://doi.org/10.14201/orl.31540>
- Jiang, X., Zhou, W., Sun, J., Chen, S. & Fun, A. (2025). Empathy enhancement through VR: A practice-led design study. *International Journal of Human-Computer Studies*. 194. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2024.103397>.
- Kaarlela, T., & Outeiro, J. (2025). A cyber-physical machine tool concept for education and workforce training in CNC machining. *Manufacturing Letters*, 44, 1209–1218. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.06.140>
- Kao, Y.-C., Lee, C.-S., Liu, Z.-R., & Lin, Y.-F. (2017). Case study of virtual reality in CNC machine tool exhibition. *MATEC Web of Conferences*, 123(00004). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712300004>
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203–220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
- Kesler, D., Arntz, A., Friedhoff, J., & Eimler, S. C. (2020). Mill Instructor: Teaching Industrial CNC Procedures Using Virtual Reality. *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality*, 231–234. <https://doi.org/10.1109/AIVR50618.2020.00048>
- Kroupa, J., Tuma, Z., Kovar, J., & Singule, V. (2018). Virtual laboratory for study of construction of machine tools. *MM Science Journal*, 2018(04), 2503–2506. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2018_11_2017100

- Kumar, N. (2025) Virtual Reality Statistics 2026: Users & Trends. 31 12 2025. [En línea]. Available: <https://www.demandsage.com/virtual-reality-statistics/#:~:text=%C2%BFCu%C3%A1ntas%20personas%20utilizan%20la%20realidad,mund o%20utilizan%20la%20tecnolog%C3%ADa%20VR.> [Último acceso: 29 1 2026].
- Liu, L., Li, W., & Chen, X. (2023). Exploration and Realization about Teaching Experimental of CNC Machine Tool Based on Virtual Simulation Technology. *Manufacturing Technology*, 23(4), 485–494. <https://doi.org/10.21062/mft.2023.066>
- McGovern, E., Moreira, G., & Luna-Nevarez, C. (2020). An application of virtual reality in education: Can this technology enhance the quality of students' learning experience? *Journal of Education for Business*, 95(7), 490–496. <https://doi.org/10.1080/08832323.2019.1703096>
- Minoufekr, M., Schug, P., Zenker, P., & Plapper, P. (2019). Modelling of CNC Machine Tools for Augmented Reality Assistance Applications using Microsoft Hololens. *Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 627–636. <https://doi.org/10.5220/0007920806270636>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Monroy Reyes, A., Vergara Villegas, O. O., Miranda Bojórquez, E., Cruz Sánchez, V. G., & Nandayapa, M. (2016). A mobile augmented reality system to support machinery operations in scholar environments. *Computer Applications in Engineering Education*, 24(6). <https://doi.org/10.1002/cae.21772>
- Nathanael, D., Mosialos, S., Vosniakos, G. C., & Tsagkas, V. (2016). Development and Evaluation of a Virtual Reality Training System Based on Cognitive Task Analysis: The Case of CNC Tool Length Offsetting. *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, 26(1). <https://doi.org/10.1002/hfm.20613>
- Nathanael, D., Vosniakos, G. C., & Mosialos, S. (2010). Cognitive task analysis for virtual reality training: The case of CNC tool offsetting. *ECCE 2010 - European Conference on Cognitive Ergonomics 2010: The 28th Annual Conference of the European Association of Cognitive Ergonomics*. <https://doi.org/10.1145/1962300.1962350>
- Paszkiewicz, A., Salach, M., Wydrzyński, D., Woźniak, J., Budzik, G., Bolanowski, M., Ganzha, M., Paprzycki, M., & Cierpicki, N. (2023). Use of Virtual Reality to Facilitate Engineer Training in the Aerospace Industry. *Machine Graphics and Vision*, 32(2). <https://doi.org/10.22630/MGV.2023.32.2.2>
- Prasetya, F., Fortuna, A., Jalinus, N., Refdinal, R., Fajri, B. R., Wulansari, R. E., Primawati, P., Andriani, W., Samala, A. D., Luthfi, A., Putra, W. P., Ayasrah, F. T. M., & Kaya, D. (2024). Revolutionizing CNC Lathe Education: Designing Instructional Media Integrated Using Augmented Reality Technology. *TEM Journal*, 1695–1701. <https://doi.org/10.18421/TEM132-82>
- Prasetya, F., Syahri, B., Fajri, B. R., Wulansari, R. E., & Fortuna, A. (2023). Utilizing Virtual Laboratory to Improve CNC Distance Learning of Vocational Students at Higher Education. *TEM Journal*, 1506–1518. <https://doi.org/10.18421/TEM123-31>
- Quintana, D., Rodriguez, A., Sbert, M., Silva, Y., Elisvan, & R., Boada, I. (2024). Non-photorealistic rendering as a feedback strategy in virtual reality for rehabilitation. *Virtual Reality*, 28. 10.1007/s10055-024-00954-9.
- Rogers, C. B., El-Mounaryi, H., Wasfy, T., & Satterwhite, J. (2017). Assessment of STEM e-learning in an immersive virtual reality (VR) environment. *Computers in Education Journal*, 8(4). <https://doi.org/10.18260/p.26336>
- Ryan, M., Wang, Y., Xiao, Q., Liu, R., & Zhang, Y. (2022). Immersive Virtual Reality Training With Error Management for CNC Milling Set-Up. *International Manufacturing Science and Engineering Conference Proceedings Series* (2). <https://doi.org/10.1115/MSEC2022-85770>
- Sendari, S., Anggreani, D., Jiono, M., Nurhandayani, A., & Suardi, C. (2020). Augmented Reality Performance in Detecting Hardware Components Using Marker Based Tracking Method. *2020 4th International Conference on Vocational Education and Training*, 1–5.

- <https://doi.org/10.1109/ICOVET50258.2020.9229895>
- Sorathiya, P. C., Anand Singh, S., & Desai, K. A. (2023). Mobile-Based augmented reality (AR) module for guided operations of CNC surface roughness machine. *Manufacturing Letters*, 35, 1255–1263. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.069>
- Tzimas, E., Vosniakos, G.-C., & Matsas, E. (2019). Machine tool setup instructions in the smart factory using augmented reality: a system construction perspective. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 13(1), 121–136. <https://doi.org/10.1007/s12008-018-0470-z>
- Vite, S. T. (2023). El metaverso tecnológico: La relación realidad-virtualidad y ciberespacio. En J. M. Sánchez-Sordo & S. Teodoro-Vite (Comps.), *Construyendo el metaverso: Una mirada multidisciplinaria a las innovaciones tecnológicas y su impacto en la sociedad* (pp. 1–22). Editorial LEED. <https://doi.org/10.22402/ed.leed.978.607.59503.3.4.c01>
- Yuan, J., Hassan, S.S., Wu, J. et al. (2023). Extended reality for biomedicine. *Nature Reviews Methods Primers*, 3(14). <https://doi.org/10.1038/s43586-023-00198-y>
- Yuen, I., Wong, F., Yuen, L. & Leung, L. (2025) Explore the extended impacts on psychological well-being in older adults through application of virtual reality technology: An integrative review. *International Journal of Nursing Studies Advances*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.ijnsa.2025.100371>.