

Realidad aumentada en el aprendizaje de materias STEM: desarrollo de habilidades espaciales en la formación en ingeniería eléctrica

Augmented reality in STEM learning: developing spatial skills in electrical
engineering training

 **Dr. Ginés Morales Méndez**

Universidad de Murcia. España.

 **Dr. Francisco del Cerro Velázquez**

Universidad de Murcia. España.

 **Dra. Ana Belén Lozano Avilés**

Universidad de Murcia. España.

Recibido: 2025/09/11; **Revisado:** 2025/09/22; **Aceptado:** 2025/10/29; **Publicado:** 2026/01/01

RESUMEN

La investigación en este trabajo estudia cuantitativamente el efecto de la realidad aumentada (RA) en las habilidades espaciales de estudiantes universitarios en la formación de ingeniería eléctrica. Con ese fin, se llevó a cabo un estudio cuasi-experimental con 80 estudiantes divididos en cuatro grupos homogéneos y sometidos a diferentes metodologías: RA utilizando dispositivos móviles (Unity y Vuforia), documentos digitales, simulaciones 3D (ANSYS Maxwell) y laboratorios. Para evaluar las habilidades espaciales, se realizaron evaluaciones estandarizadas como Mental Rotation Test (MRT) y Spatial Visualization Test (SVT); la carga cognitiva se midió con NASA Task Load Index; la motivación intrínseca se evaluó utilizando el modelo ARCS de Keller, y el rendimiento académico se determinó mediante pruebas teóricas y prácticas sobre motores de inducción asíncronos. Los resultados del estudio indican que la RA ayudó a desarrollar las habilidades espaciales y redujo la carga cognitiva, al tiempo que mantuvo un mayor nivel de atención, relevancia, confianza y satisfacción en comparación con las otras tres metodologías empleadas. También se identifica un aumento del rendimiento académico. Por último, el estudio establece la viabilidad técnica y pedagógica de la RA como recurso educativo e identifica su potencial para su inclusión en la enseñanza STEM.

ABSTRACT

This research study employs a quantitative approach to examine the impact of augmented reality (AR) on the spatial skills of university students enrolled in electrical engineering programmes. For this purpose, a quasi-experimental study was conducted. The study involved 80 students, who were divided into four homogeneous groups. The groups were subjected to different methodologies. The application of augmented reality (AR) utilises mobile devices (Unity and Vuforia), digital documents, 3D simulations (ANSYS Maxwell) and laboratories. In order to assess spatial skills, standardised assessments such as the Mental Rotation Test (MRT) and Spatial Visualisation Test (SVT) were conducted. In addition, cognitive load was measured using the NASA Task Load Index. Intrinsic motivation was assessed using Keller's ARCS model, while academic performance was determined through theoretical and practical tests on asynchronous induction motors. The results of the study indicate that AR helped develop spatial skills and reduced cognitive load, while maintaining a higher level of attention, relevance, confidence, and satisfaction compared to the other three methodologies used. It was also noted that there was an increase in academic performance. Finally, the study establishes the technical and pedagogical feasibility of AR as an educational resource and identifies its potential for inclusion in STEM education.

PALABRAS CLAVES · KEYWORDS

Realidad aumentada; habilidad espacial; carga cognitiva; ingeniería; educación STEM.
Augmented reality; spatial ability; cognitive load; engineering; STEM education.

1. Introducción

Las habilidades espaciales constituyen un componente importante de la formación de ingenieros, ya que la capacidad de visualizar, evaluar y manipular mentalmente objetos tridimensionales es fundamental para comprender conceptos técnicos y resolver problemas abstractos. Por ejemplo, la ingeniería eléctrica implica interpretar diagramas de circuitos, colocar dispositivos en paneles de control y diseñar sistemas electromecánicos. Todas estas actividades se basan en el conocimiento espacial y las habilidades relevantes asociadas a él, como la inteligencia espacial (Uttal et al., 2013). Estas habilidades se han reconocido de manera amplia en la literatura como predictores del éxito académico y profesional en las áreas de conocimiento STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas), ya que permiten razonar a través de la toma de decisiones informadas y la resolución de problemas mediante razonamiento estructurado (Sorby, 2009).

Por lo general, la formación en estas habilidades se basaba en métodos bidimensionales y en el diseño asistido por ordenador (CAD). Estos métodos presentan limitaciones en cuanto a interactividad e inmersión, lo que puede impedir la integración eficaz de información compleja y abstracta en las experiencias de aprendizaje técnico (Garzón et al., 2019). En este sentido, la RA ha surgido como una tecnología innovadora y disruptiva con un potencial significativo para transformar la enseñanza, al proporcionar modelos tridimensionales interactivos como parte de la realidad física, generando valor y mejorando las experiencias de aprendizaje (Azuma, 1997; del Cerro & Morales, 2021; Asham et al., 2023). La RA, a diferencia de otras herramientas digitales, permite crear entornos de aprendizaje activos y contextualizados en los que los estudiantes pueden interactuar, explorar y experimentar de forma segura y eficiente, optimizando así los conocimientos adquiridos a través de las experiencias de aprendizaje (Martín-Gutiérrez et al., 2015).

No obstante, y a pesar de los avances obtenidos, la literatura presenta todavía limitaciones en la investigación asociada a la comparación cuantitativa de la RA con otros enfoques didácticos que son empleados para la enseñanza en ingeniería, los cuales suelen basarse: en documentos digitales en formato pdf apoyados en presentaciones audiovisuales, en simulaciones y diseños 3D y en laboratorios físicos tradicionales (Ismail et al., 2019). En particular, en la literatura se evidencia la carencia de estudios que pongan a prueba cómo las diferentes metodologías inciden en el desarrollo de las habilidades espaciales, la carga cognitiva percibida y la motivación intrínseca del alumnado. Para poder cerrar esta brecha se hace necesario el uso de un diseño cuasi-experimental que permita explorar la evaluación de estas variables aplicando pruebas estandarizadas de habilidades espaciales, escalas validadas para la carga cognitiva como el NASA Task Load Index (Hart, 2006), y modelos de evaluación de la motivación (Ma & Lee, 2021).

De acuerdo con lo anteriormente indicado, en el planteamiento del presente trabajo se propone una evaluación cuantitativa y comparativa del efecto de la RA en contraste a otros métodos docentes para el aprendizaje y desarrollo de habilidades espaciales en estudiantes de ingeniería eléctrica aplicando pruebas pre-test y post-test con respecto a estas habilidades, a la carga cognitiva experimentada y al nivel de motivación hacia el aprendizaje. De esta forma, pretendemos generar evidencias empíricas sobre la validez de la RA como recurso de enseñanza-aprendizaje que puedan servir como criterio para el uso de la misma en la educación en ingeniería. Además, que los resultados puedan extrapolarse a otras áreas STEM donde las habilidades espaciales son un prerrequisito para la formación de profesionales en la era digital y la Industria 4.0.

2. Aprendizaje aumentado en áreas de conocimiento STEM

La RA se ha consolidado como una tecnología clave en la transformación de la educación en las disciplinas STEM, al proporcionar entornos de aprendizaje altamente inmersivos e interactivos. A diferencia de los métodos tradicionales, la RA permite la superposición de elementos digitales tridimensionales, anotaciones y simulaciones interactivas sobre el entorno físico, lo que facilita la comprensión de conceptos abstractos al integrarlos en un contexto tangible y manipulable (Arena et al., 2022). Su capacidad para combinar el mundo físico con representaciones virtuales mejora el proceso de enseñanza-aprendizaje, ya que permite la experimentación segura y el desarrollo de habilidades cognitivas complejas, promoviendo un aprendizaje significativo y autónomo (Prasetya et al., 2024).

Desde la perspectiva cognitiva, la RA representa una solución ideal para reducir la carga cognitiva intrínseca, en la medida en que la información se distribuye en diferentes modalidades sensoriales sin sobrecargar la memoria de trabajo, facilitando la adquisición de conocimientos abstractos (Buchner et al., 2022). Esto adquiere especial significado en la enseñanza de la ingeniería y, en particular, de la ingeniería eléctrica, dado que la comprensión de circuitos eléctricos, sistemas de control y máquinas eléctricas depende de la interacción simultánea con información gráfica, simbólica y matemática (García et al. 2023). Por otro lado, la RA permite a los estudiantes disponer de información procesada en tiempo real para detectar errores conceptuales y optimizar la experiencia de aprendizaje mientras se reduce la supervisión docente (Wu et al., 2022).

Las habilidades espaciales constituyen una habilidad cognitiva de fundamental importancia en la formación del ingeniero, ya que se relacionan con la capacidad de interpretar esquemas eléctricos, con la visualización de configuraciones tridimensionales de sistemas de control (Elford et al., 2022) o la comprensión de la disposición de los elementos eléctricos (Papakostas et al., 2021). Las habilidades espaciales no son solo habilidades innatas, sino que también pueden mejorarse mediante la práctica y la experiencia en entornos que permiten la manipulación y la exploración física de modelos tridimensionales (Bogomolova et al., 2020). El uso de entornos aumentados ha crecido hasta tal punto que se ha convertido en una de las contribuciones tecnológicas más beneficiosas para la enseñanza de la ingeniería, ya que proporciona sistemas eléctricos que pueden visualizarse, girarse y mantenerse en un entorno físico, lo que permite desarrollar un modelo mental más preciso y reducir los errores conceptuales (Kim & Irizarry, 2021).

La incorporación de la RA en la enseñanza ha demostrado varias ventajas significativas, entre ellas la retención de conocimientos, la reducción de la carga cognitiva y una resolución más precisa de problemas espaciales (Yang et al., 2023). Estudios previos han demostrado que los estudiantes que utilizan la RA para aprender sobre circuitos eléctricos, transformadores y sistemas de distribución de energía obtienen mejores resultados en las evaluaciones de visualización espacial que los estudiantes que utilizan métodos tradicionales (Kanivets et al., 2022). Además, las representaciones digitales con interacciones físicas ofrecen la ventaja de reforzar los mecanismos de aprendizaje y transferir el conocimiento al contexto del mundo real, donde los estudiantes pueden desarrollar y aplicar los conceptos técnicos aprendidos (An et al., 2019; Tarasenko et al., 2021; Álvarez-Marín & Velázquez-Iturbide, 2022).

La enseñanza de la ingeniería ha ido evolucionando y ha estado marcada por el uso de diversas metodologías didácticas que, desde las características que las definen, tienen

aplicaciones específicas. De todas ellas, las principales y más utilizadas en la formación académica son: los recursos en pdf apoyados en la presentación de diapositivas que permiten organizar y compartir la información de forma accesible; las simulaciones por ordenador y las representaciones tridimensionales animadas que dan la posibilidad de mostrar el comportamiento de sistemas eléctricos en un entorno virtual; y los laboratorios, que facilitan la interacción con el material con el que se aprende y la posibilidad de aplicar conocimientos en una situación práctica. El amplio repertorio de metodologías didácticas que determinan la enseñanza de la ingeniería implica que la eficacia de cada una de estas sea muy variable en función del nivel de interactividad, accesibilidad, experimentación y extrapolación a entornos reales, lo que ha propiciado la búsqueda de nuevas prácticas didácticas como la RA.

Los recursos tecnológicos de enseñanza, que incluyen documentos pdf o las presentaciones de diapositivas, son recursos bastante utilizados gracias a su accesibilidad, a su sencillez a la hora de ponerlos en uso y distribuirlos, y a la posibilidad de tener todos los documentos siempre actualizados (Bourbour, 2023). En otro sentido, se observan limitaciones en el ámbito de la interactividad, así como de la representación tridimensional, que contribuyen a aumentar las dificultades para asimilar sistemas eléctricos complejos, además de no favorecer a que se desarrollen las habilidades espaciales (Guillén-Gámez et al, 2022). Así también, son considerados como recursos pasivos que puede incidir en una escasa retención de los conocimientos, y afectar al grado de atención del alumnado, especialmente con los contenidos de tipo técnico (Oguguo et al, 2023).

Por otra parte, el uso de simulaciones con software y de diseños 3D animados han resultado recursos educativos de utilidad para modelizar y analizar sistemas eléctricos en un entorno controlado, siendo un recurso que permite al alumnado observar el comportamiento dinámico de los circuitos y de los componentes que forman parte de ellos (Bogusevski et al., 2020). Ahora bien, su aplicación requiere de ordenadores y de software específico, su uso puede quedar limitado, pueden quedar restricciones en el uso en ciertos espacios educativos (O'Connor et al, 2021); y aunque sean ventajosos en cuanto a su representación gráfica, no se ha llegado a conseguir una integración efectiva con el mundo real, de forma que puede verse perjudicada la transferencia del conocimiento a contextos prácticos (Ahn et al., 2020).

Los laboratorios continúan siendo la norma en la enseñanza de la ingeniería ya que permiten obtener la experiencia de trabajar directamente con este tipo de equipos y dispositivos y también permite desarrollar las competencias prácticas y trabajarlas en situaciones concretas (Kapici et al., 2019). Sin embargo, los laboratorios tienen ciertas limitaciones, como los costes de mantenimiento elevados, el limitado acceso a ellos y los problemas de seguridad que conllevan los ensayos de sistemas eléctricos de alta potencia (Thees et al., 2020). El acceso restringido a los laboratorios también limita la posibilidad de repetir las prácticas, lo que puede tener una consecuencia negativa en la consolidación del aprendizaje.

En este sentido, la RA se presenta como una herramienta integradora que unifica las posibilidades de los sistemas más tradicionales y las posibilidades inmersivas y participativas de los medios digitales. Al proyectar modelos tridimensionales en el mundo físico, los estudiantes interactuarán con circuitos eléctricos, componentes electromecánicos o sistemas de control de una manera que reduce las barreras de acceso a este aprendizaje experimental (Alzahrani, 2020). La RA también ofrece ventajas en cuanto a flexibilidad y

seguridad, ya que puede escenificar situaciones complejas del mundo real sin el riesgo que supone trabajar con determinados equipos eléctricos en el laboratorio.

3. Metodología

El diseño de la investigación es cuasi-experimental con un enfoque cuantitativo con el objetivo de analizar el efecto de la RA en la mejora de las habilidades espaciales y en la motivación del alumnado en la enseñanza los contenidos de ingeniería eléctrica. Se compara el rendimiento de la implementación de la RA, con el de la enseñanza de otras tres metodologías didácticas que se utilizan en este ámbito: documentos digitales (pdf y diapositivas), simulaciones 3D por ANSYS Maxwell; y laboratorios. En este sentido, también se analiza el impacto de cada método en el rendimiento académico y en la carga cognitiva que perciben los estudiantes, preservando, así, la validez interna del presente estudio mediante la asignación de los participantes a grupos homogéneos en las variables que podrían afectar al rendimiento, por la diferencia de la metodología pedagógica aplicada a cada caso (Slack & Draugalis Jr, 2001).

El objetivo general de esta investigación radica en evaluar la eficacia del uso de RA en dispositivos móviles para el desarrollo de habilidades espaciales en estudiantes de ingeniería eléctrica, en comparación con otros métodos de enseñanza. A partir de este objetivo general se determinan los objetivos específicos expuestos a continuación:

1. Cuantificar el grado de adquisición de habilidades espaciales de los estudiantes tras la intervención mediante la utilización de cada una de las metodologías de enseñanza.
2. Comparar la carga cognitiva percibida del alumnado en cada grupo de estudio a través de la escala NASA Task Load Index (TLX) (Hart, 2006).
3. Analizar la motivación y satisfacción del alumnado mediante el cuestionario estructurado bajo la base del modelo ARCS de Keller (Keller, 1987).
4. Determinar la relación existente entre carga cognitiva, motivación, rendimiento en test espaciales y grado de aprendizaje conseguido, y extraer correlaciones estadísticamente significativas.
5. Evaluar la viabilidad pedagógica y logística de la implementación de RA en la enseñanza de la ingeniería eléctrica.

En base a estos objetivos se formulan las siguientes hipótesis de trabajo:

- H_1 : La RA en smartphones contribuye significativamente a mejorar las habilidades espaciales en comparación con el uso de documentos digitales, simulaciones 3D y laboratorios.
- H_2 : La carga cognitiva percibida será menos en estudiantes que la que utilizan RA en comparación a los que emplean documentos digitales, simulaciones 3D y laboratorios.
- H_3 : El uso de la RA propiciará mayores niveles de motivación y satisfacción en el proceso de aprendizaje.
- H_4 : La carga cognitiva percibida se asociará de una manera inversamente proporcional al rendimiento en las pruebas, de modo que un menor esfuerzo cognitivo se relacionará con un mayor rendimiento.
- H_5 : La implementación a gran escala de RA en dispositivos móviles es pedagógicamente viable y logísticamente factible en la enseñanza de ingeniería

eléctrica, de acuerdo con los índices de aceptación y de facilidad de integración curricular respecto a los métodos contrastados.

La muestra de partida del estudio está conformada por 80 estudiantes del segundo curso de la titulación de grado de Ingeniería Química de la Universidad de Murcia, matriculados en la asignatura Ingeniería Eléctrica y Electrónica. El alumnado fue asignado de forma homogénea a cuatro grupos, de 20 estudiantes cada uno (Tabla 1), lo que asegura su equivalencia en términos de edad, conocimiento previo y habilidad con herramientas digitales. Esta homogeneidad en la composición de los grupos permite controlar con eficacia la influencia de las variables ajenas al estudio, con lo que garantizamos que cualquier diferencia de resultados sea atribuida a la metodología de enseñanza que seguíamos en cada una de las condiciones experimentales (Lorenzi-Cioldi, 1998). La docencia de todos los grupos estuvo a cargo del mismo equipo docente, lo que asegura la uniformidad en la instrucción y elimina sesgos relacionados con la exposición de los contenidos o con el estilo pedagógico del profesorado. Así pues, también se controla la variable independiente del estudio, y se puede evaluar de forma objetiva el impacto de la RA sobre la adquisición de habilidades espaciales, carga cognitiva, motivación y aprendizaje adquirido por el alumnado.

Tabla 1

Distribución de la muestra según el método didáctico empleado.

Grupo	Método didáctico	N
GE	Realidad Aumentada en smartphones (Unity + Vuforia)	20
GC1	Documentos digitales (PDF y presentaciones en diapositivas)	20
GC2	Simulaciones 3D en ordenador (ANSYS Maxwell)	20
GC3	Laboratorios físicos tradicionales	20

Nota: GE = Grupo Experimental, GC = Grupo de Control.

La intervención se ha desarrollado en seis sesiones de una hora de duración cada una, las cuales se han acompañado de explicaciones teóricas del funcionamiento del motor de inducción asíncrono (Chen et al., 2020). Estas sesiones están alineadas con la guía docente de la asignatura, donde se han seleccionado tres ejes temáticos vinculados con el motor eléctrico, abordando el funcionamiento, la conexión y el control automático.

La RA se ha implementado en smartphones mediante Unity (versión 2023.2.20f1) y Vuforia Engine Package for Unity (versión 10.20.3). Unity es una plataforma de desarrollo en tiempo real muy utilizada para el desarrollo de videojuegos y aplicaciones interactivas, que permite la creación de experiencias inmersivas en 3D. Por su parte, Vuforia Engine Package for Unity, compatible con ARCore y ARKit, permite realizar aplicaciones de RA gracias a sus herramientas avanzadas para el reconocimiento de imágenes, objetos y planos; se incorpora en Unity a través del Package Manager o importando el Unity Asset Package desde el portal de desarrolladores de Vuforia Engine proporcionando un uso flexible y accesible en dispositivos Android e iOS (Figura 1).

Figura 1

Modelo 3D de un motor eléctrico asíncrono en Unity para su posterior integración en RA con el Vuforia Engine.

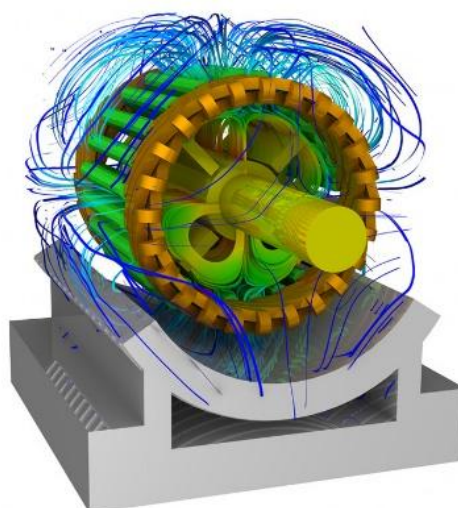


Fuente: elaboración propia.

Las simulaciones 3D se llevan a cabo mediante ANSYS Maxwell (versión 2024 R1), software de modelado y simulación de campos electromagnéticos en 2D y 3D, el cual es ampliamente utilizado en la industria para el análisis y diseño de motores eléctricos, transformadores y dispositivos electromagnéticos con una alta fidelidad en la simulación (Figura 2).

Figura 2

Simulación del campo electromagnético en un motor eléctrico asíncrono con ANSYS Maxwell 2024 R1.



Fuente: elaboración propia.

Para garantizar la validez y fiabilidad de las medidas, se seleccionan instrumentos de recolección de datos estandarizados y validados por otras investigaciones. La Tabla 2 muestra la colección de instrumentos utilizados en la investigación, e incluye las variables que se evalúan, así como sus correspondientes referencias.

Tabla 2

Instrumentos de recolección de datos utilizados en la investigación.

Instrumento	Variable evaluada	Referencia
Mental Rotation Test (MRT)	Habilidades espaciales	(Ariali, 2020)
Spatial Visualization Test (SVT)	Manipulación mental de objetos 3D	(Branoff, 2000)
NASA Task Load Index (TLX)	Carga cognitiva percibida	(Hart, 2006)
Cuestionario ARCS	Motivación y satisfacción	(Ma & Lee, 2021)
Prueba de contenido	Prueba escrita y práctica de conceptos eléctricos	(Cronbach, 1951)

La prueba de contenido que se presenta y lleva a cabo por el equipo docente pretende evaluar la aplicación teórica y práctica de los contenidos eléctricos enseñados. Dada la medición de la consistencia interna, se ha calculado el coeficiente alfa de Cronbach (Cronbach, 1951), obteniendo un valor de .97, es decir, una fiabilidad alta que determina la validez del instrumento como herramienta de evaluación de los contenidos impartidos. En su diseño, los ítems que se han seleccionado son los más representativos del plan de estudios garantizando de esta manera la validez de contenido y la adecuación al contexto académico. Con el fin de poder evaluar la adquisición de conocimientos y su aplicación en contextos reales se ha diseñado una prueba escrita y práctica que se articula en dos partes complementarias.

La prueba escrita incluye preguntas teóricas y problemas aplicados y cubre, el funcionamiento y las partes constitutivas del motor, las distintas configuraciones de

conexiones, los cálculos de las corrientes de línea y fase y el análisis de las curvas características. Así mismo contempla estrategias de compensación del factor de potencia y su optimización en entornos industriales.

La prueba práctica contempla el montaje y conexión del motor en la conexión que le corresponde según la configuración de tensiones, verificar su funcionamiento a partir de la medición de tensión, corriente y factor de potencia en vacío, identificando las pérdidas del sistema y realizar automatismos eléctricos: inversión de giro, arranque directo del motor y arranque mediante estrella/triángulo.

La fase de la intervención experimental se estructuró en cinco etapas para garantizar la comparación entre grupos y para saber cuál de las metodologías didácticas estaba generando más o menos impacto de habilidades espaciales, carga cognitiva, motivación y aprendizaje del alumnado (Tabla 3).

Tabla 3
Fase de la intervención experimental.

Etapa	Descripción
Pre-test	Evaluación inicial de habilidades espaciales y conocimientos previos.
Sesiones de aprendizaje	Aplicación del método didáctico asignado a cada grupo (RA, documentos digitales, simulaciones 3D o laboratorio)
Evaluación inmediata	Aplicación de la escala NASA TLX al finalizar la sesión, para medir la carga cognitiva percibida.
Post-Test	Medición final de las habilidades espaciales (MRT/SVT) y motivación (ARCS).
Prueba de contenido	Prueba teórico-práctica relacionada con motores eléctricos, validando la transferencia de los aprendizajes.

El análisis de los datos se llevó a cabo mediante SPSS (versión 28.0.1.1). Se empleó estadística descriptiva para caracterizar la muestra, seguida de ANOVA con pruebas post hoc de Tukey (Brown, 2005) para determinar diferencias significativas entre los grupos en habilidades espaciales, carga cognitiva, motivación y aprendizaje. Además, se realizaron correlaciones de Pearson para examinar la relación entre carga cognitiva, motivación, desempeño en pruebas espaciales y aprendizaje adquirido, y se aplicó un análisis de covarianza ANCOVA (Keselman et al., 1998) para controlar el impacto de variables externas como familiaridad con tecnologías digitales o nivel de conocimientos previos.

4. Resultados

En esta sección se presentan los hallazgos obtenidos tras la aplicación de los cuatro métodos didácticos investigados: RA documentos digitales (pdf y presentaciones en diapositivas), simulaciones 3D (ANSYS Maxwell) y laboratorios. Para ofrecer una visión integral, se incluye la caracterización de la muestra y el análisis estadístico global (ANOVA,

correlaciones y ANCOVA). A continuación, se exponen de forma detallada los resultados relativos al desarrollo de habilidades espaciales, la carga cognitiva percibida, la motivación del alumnado y el desempeño académico en la prueba de contenido.

4.1. Caracterización de la muestra y análisis estadístico global

4.1.1. Caracterización sociodemográfica y conocimientos previos

La muestra estuvo compuesta por 80 estudiantes de la asignatura Ingeniería Eléctrica y Electrónica, distribuidas por igual en los grupos de experimento y control. Se garantizó la homogeneidad en variables como la edad, género, conocimientos previos y el uso de herramientas digitales.

El análisis de la edad mostró una media de 21 años (rango: 19-24 años), no mostrando diferencias significativas ($p > .05$) entre los grupos. En cuanto a la distribución por género, el 68.8% fueron hombres y el 31.2% mujeres, mostrando proporciones equivalentes en cada grupo ($p > .05$).

Respecto a los conocimientos previos de ingeniería eléctrica, se realizó una prueba escrita mostrando una media de 6.2 puntos de un máximo de 10. El análisis estadístico confirmó la ausencia de diferencias significativas entre los grupos ($p > .05$), asegurando condiciones iniciales equivalentes. Asimismo, se midió la familiaridad con herramientas digitales en una escala de 1 a 5, obteniendo una media de 3.8, sin diferencias significativas ($p > .05$).

En la Tabla 4, se presentan los valores detallados de estas variables para cada grupo, evidenciando la distribución homogénea de la muestra, lo cual permite atribuir las diferencias en los resultados exclusivamente a la metodología didáctica empleada.

Tabla 4

Características sociodemográficas y nivel de conocimientos previos de la muestra.

Variable	Categoría/rango	GE	GC1	GC2	GC3	Total
Edad (años)	Media	20.8	21.1	20.9	21	21
	(DE)	(1.3)	(1.5)	(1.2)	(1.4)	(1.3)
	[Mín.-Máx.]	[19–23]	[19–24]	[19–23]	[19–24]	[19–24]
Género	Hombres	13	14	13	15	55
	(%)	(65%)	(70%)	(65%)	(75%)	(68.8%)
	Mujeres	7	6	7	5	25
	(%)	(35%)	(30%)	(35%)	(25%)	(31.2%)
Conocimientos previos	Media (DE)	6.2 (.8)	6.1 (.9)	6.3 (.7)	6.2 (.6)	6.2 (.8)
	[Mín.-Máx.]	[5–8]	[4–8]	[5–8]	[5–7]	[4–8]
Familiaridad con TIC (1-5)	Media (DE)	3.8 (.4)	3.7 (.5)	3.9 (.4)	3.6 (.5)	3.8 (.5)
	[Mín.-Máx.]	[3–4]	[3–5]	[3–5]	[3–5]	[3–5]

4.1.2. Comparaciones entre grupos (ANOVA) y pruebas post hoc

Para analizar el impacto de los cuatro métodos didácticos evaluados, se aplicó un ANOVA unifactorial, seguido de pruebas post hoc de Tukey para identificar diferencias significativas entre los grupos, donde se evaluaron cinco variables clave: MRT, SVT, NASA TLX, ARCS y la prueba de contenido.

Los resultados mostraron diferencias significativas en todas las variables ($p < .01$), con tamaños del efecto (η^2) entre .18 y .28, indicando un impacto moderado a alto de la metodología didáctica (Tabla 5).

Tabla 5

ANOVA unifactorial y pruebas post hoc para las principales variables de estudio.

Variable	F	p	η^2	Diferencias principales (Tukey)
MRT (post-test)	8.34	< .01	.25	GE > GC1 ($p < .01$), GE > GC3 ($p < .01$), GE > GC2 ($p < .05$)
SVT (post-test)	9.11	< .01	.28	GE > GC1 ($p < .01$), GE > GC3 ($p < .01$), GE > GC2 ($p < .05$)
NASA TLX	7.21	< .01	.22	GE < GC1 ($p < .01$), GE < GC3 ($p < .01$), GE < GC2 ($p < .05$)
ARCS	5.66	< .01	.18	GE > GC1 ($p < .01$), GE > GC3 ($p < .05$), GC2 > GC1 ($p < .05$)
Prueba de contenido	9.01	< .01	.26	GE > GC1 ($p < .01$), GE > GC3 ($p < .05$), GC2 > GC1 ($p < .05$)

Los análisis confirman que GE obtuvo los mejores resultados en MRT, SVT, ARCS y prueba de contenido, superando significativamente a los grupos de control. Además, GE mostró la menor carga cognitiva en NASA TLX, lo que indica que esta metodología facilita el aprendizaje con menor esfuerzo mental.

4.1.3. Matriz de correlaciones Pearson

Para analizar la relación entre las variables clave del estudio, se calculó la matriz de correlaciones de Pearson, la cual evalúa la asociación entre NASA TLX, ARCS, MRT, SVT y la prueba de contenido. Como se observa en la Tabla 6, existe una correlación negativa entre NASA TLX y el resto de las variables, lo que indica que una menor carga cognitiva se asocia con mayor motivación, mejor desempeño en habilidades espaciales y mejores resultados en la prueba de contenido. En particular, la relación más fuerte se presenta con MRT ($r = -.58$, $p < .01$), sugiriendo que los estudiantes con menor esfuerzo cognitivo tienden a obtener mejores puntuaciones en habilidades espaciales. Por otro lado, ARCS muestra

una correlación positiva significativa con MRT ($r = .59$, $p < .01$) y con la prueba de contenido ($r = .63$, $p < .01$), lo que confirma que una mayor motivación se asocia con un mejor rendimiento académico y en habilidades espaciales.

Tabla 6

Correlaciones de Pearson entre las variables principales del estudio.

Variable	NASA TLX	ARCS	MRT	SVT	P. contenido
NASA TLX	1	-.55**	-.58**	-.50**	-.48**
ARCS	-.55**	1	.59**	.51*	.63**
MRT	-.58**	0.59**	1	.69**	.65**
SVT	-.50**	.51*	.69**	1	.54*
P. contenido	-.48**	.63**	.65**	.54*	1

Nota: * $p < .05$, ** $p < .01$ (bilateral).

4.1.4. Análisis de covarianza (ANCOVA)

Para controlar el efecto de covariables como los conocimientos previos y la familiaridad con las TIC, se aplicó un ANCOVA, utilizando como variable independiente el método didáctico. Este análisis permitió determinar si las diferencias en el desempeño de los estudiantes persistían tras ajustar por estas variables, garantizando que los efectos observados fueran atribuibles a la metodología empleada y no a factores externos.

La Tabla 7 muestra los resultados del ANCOVA para MRT, donde se observa que tanto los conocimientos previos ($F = 12.05$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .14$) como la familiaridad con TIC ($F = 7.21$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .09$) influyen en el rendimiento. Sin embargo, el método didáctico mantiene un efecto significativo sobre MRT ($F = 12.42$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .33$), lo que indica que la metodología aplicada tiene un impacto considerable en el desarrollo de habilidades espaciales, incluso después de controlar estas covariables.

Tabla 7

Resultados de ANCOVA para MRT.

Fuente de variación	SC	gl	CM	F	p	η_p^2
Covariable 1	154.27	1	154.27	12.05	< .01	.14
Covariable 2	92.33	1	92.33	7.21	< .01	.09
Método didáctico	280.52	3	93.51	12.42	< .01	.33
Error (residual)	571.20	74	7.72			
Total	1098.32	79				

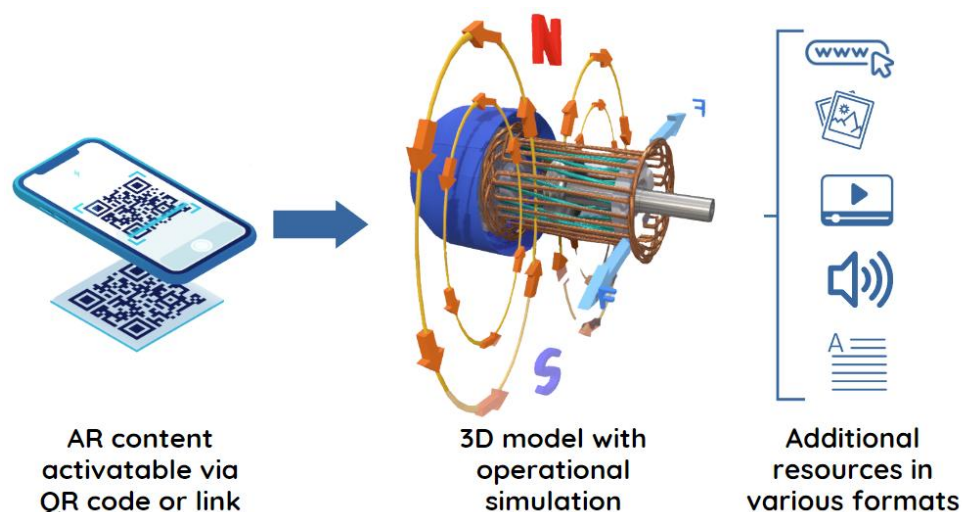
Los resultados de la ANCOVA confirman que, incluso ajustando por diferencias iniciales en conocimientos y familiaridad digital, el factor “método didáctico” mantiene un efecto significativo sobre las puntuaciones de MRT ($p < .01$, $\eta_p^2 = .33$), reforzando la solidez de los hallazgos.

4.2. Visualización del prototipo de RA y laboratorio físico

Con el fin de ilustrar la integración de la RA en el estudio del motor de inducción asíncrono, en la Figura 3 se presenta el proceso de activación y visualización del contenido en RA. Para ello, el usuario no requiere conocimientos avanzados de desarrollo en RA, pues basta con acceder al enlace directo o escanear un código QR. Este proceso se lleva a cabo mediante la app Vuforia View (versión 9.23.1) para dispositivos móviles, la cual emplea un sistema de reconocimiento espacial basado en visión artificial que elimina la necesidad de utilizar marcadores físicos (RA sin marcadores). Dicha tecnología permite identificar superficies planas del entorno real con la cámara del dispositivo, facilitando así una interacción intuitiva y accesible con los modelos virtuales superpuestos.

Figura 3

Proceso de activación y visualización del contenido de RA.

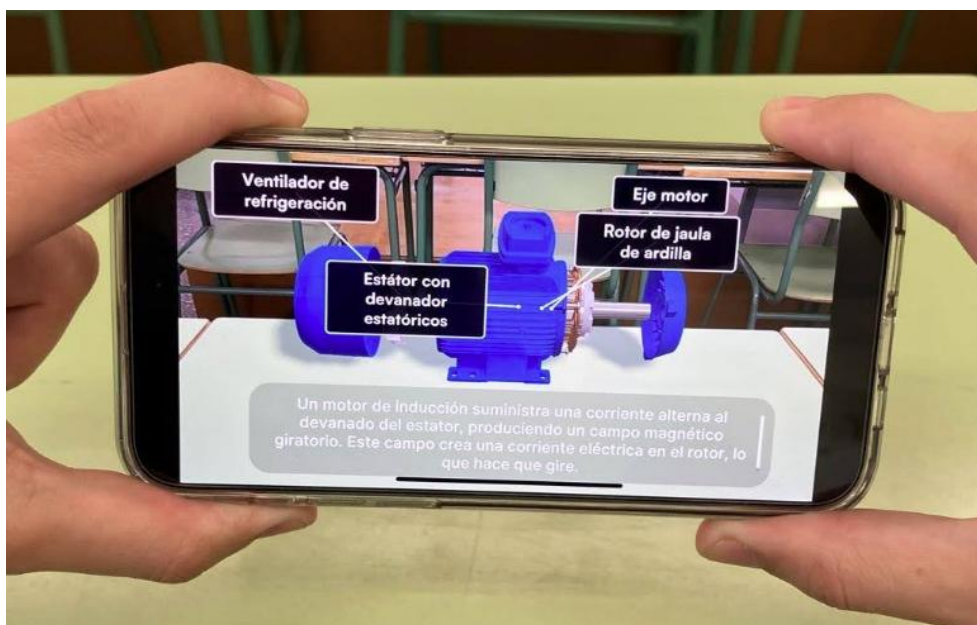


Fuente: elaboración propia.

Seguidamente, en la Figura 4 se muestra el contenido aumentado activado en un smartphone desarrollado en Unity (versión 2023.2.20f1) utilizando el paquete Vuforia Engine (versión 10.20.3). El modelo integra movimiento, animaciones y etiquetas interactivas de los principales componentes del motor de inducción asíncrono (ventilador de refrigeración, bobinado del estator, rotor de jaula de ardilla y eje), lo que facilita la exploración detallada de su estructura interna y su principio de funcionamiento.

Figura 4

Diseño 3D de un motor de inducción asíncrono activado por RA en Vuforia View, donde se aprecian el ventilador de refrigeración, el bobinado del estator, el rotor de jaula de ardilla y el eje del motor.

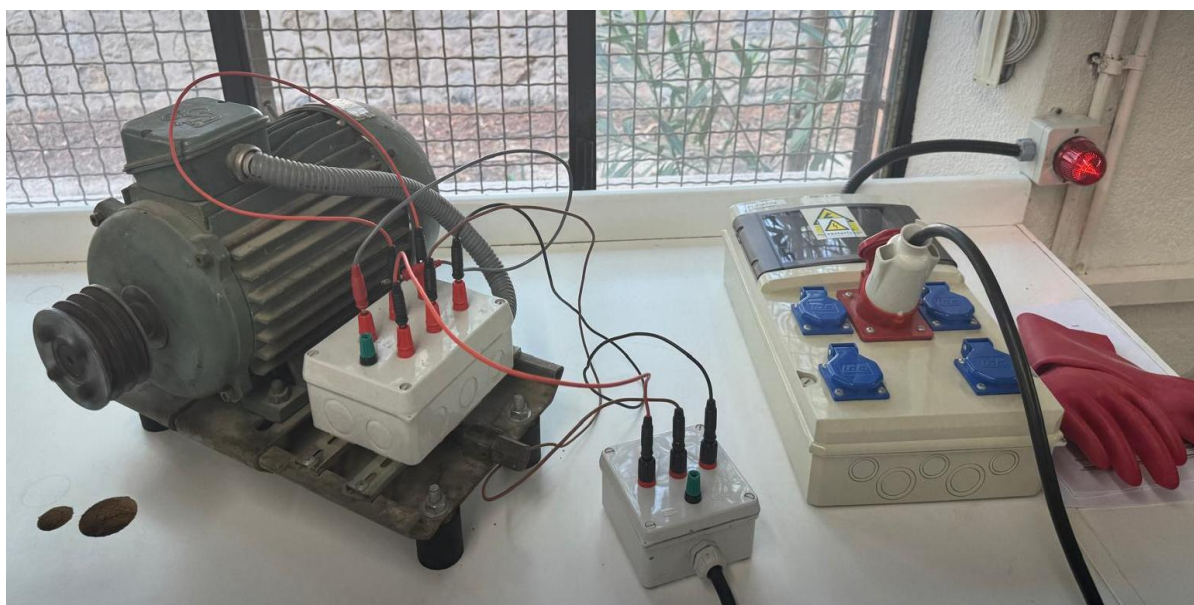


Fuente: elaboración propia.

Por su parte, la Figura 5 muestra el motor de inducción asíncrono del taller de ingeniería (GC3), el cual se utilizó para la práctica del arranque directo, en este caso en estrella y la medición de variables eléctricas (corriente, voltaje, factor de potencia). Dichas experiencias prácticas posibilitaron contrastar, en un entorno real, los resultados obtenidos con los métodos digitales y de RA.

Figura 5

Motor de inducción asíncrono del taller.



Fuente: elaboración propia.

4.3. Desarrollo de habilidades espaciales

El efecto de los diferentes métodos en la adquisición y mejora de las habilidades espaciales se evaluó mediante el MRT y el SVT. En la Tabla 8 se presentan los resultados descriptivos (media y desviación estándar) obtenidos en el post-test de cada prueba, así como los valores de la ganancia media (Δ) respecto al pre-test.

Tabla 8

Resultados descriptivos en pruebas de habilidades espaciales (MRT y SVT).

Grupo	MRT Post-test (Media $\pm$ DE)	SVT Post-test (Media $\pm$ DE)	Δ MRT	Δ SVT
GE	29.3 $\pm$ 3.1	25.8 $\pm$ 2.6	+7.2	+6.8
GC1	23.4 $\pm$ 2.9	20.5 $\pm$ 3	+4.5	+3.9
GC2	26.1 $\pm$ 3	22.7 $\pm$ 2.8	+5.9	+4.8
GC3	24.2 $\pm$ 2.5	21.1 $\pm$ 2.2	+5	+4.1

Se observa que el GE, que empleó RA en smartphones, alcanzó valores significativamente superiores en el MRT y el SVT en comparación con los grupos de control. La Δ también resulta mayor en GE, lo cual sugiere que la interactividad y la inmersión brindadas por la RA aportaron un entorno propicio para el desarrollo de las habilidades de rotación mental y visualización espacial.

El ANOVA mostró diferencias estadísticamente significativas en los valores finales de MRT ($F_{(3.76)} = 8.34$, $p < .01$) y de SVT ($F_{(3.76)} = 9.11$, $p < .01$). Las pruebas post hoc de Tukey confirmaron que la diferencia más pronunciada se ubicó entre el GE y los grupos de control GC1 y GC3 ($p < .01$). Si bien el grupo con simulaciones 3D mediante ANSYS Maxwell (GC2) también evidenció mejoras sustanciales, sus resultados fueron estadísticamente inferiores a los del GE, aunque superiores a los de GC1 y GC3 ($p < .05$).

4.4. Carga cognitiva percibida

El efecto de los diferentes métodos La carga cognitiva se evaluó mediante la escala NASA TLX, administrada al finalizar cada sesión de trabajo (post-test inmediato). Los factores analizados incluyeron demanda mental, demanda física, demanda temporal, esfuerzo, frustración y rendimiento percibido. La Tabla 9 resume los valores promedios de la carga cognitiva total obtenida por los participantes de cada grupo.

Tabla 9

Carga cognitiva percibida según la escala NASA TLX (post-test inmediato).

Grupo	NASA TLX (Media $\pm$ DE)
GE	39.2 $\pm$ 5.8
GC1	47.5 $\pm$ 6.2
GC2	42.6 $\pm$ 5.5
GC3	45.8 $\pm$ 5.9

El ANOVA para la carga cognitiva percibida (NASA TLX) evidenció diferencias significativas entre los ($F_{(3,76)} = 7.21, p < .01$). El GE reportó los niveles más bajos de carga cognitiva, situándose por debajo de GC1 y GC3 ($p < .01$) y ligeramente por debajo de GC2 ($p < .05$). Este hallazgo respalda la hipótesis de que la RA, al ofrecer representaciones gráficas e informativas altamente integradas con el entorno físico, facilita la distribución del procesamiento cognitivo y reduce el esfuerzo mental requerido para comprender la configuración y el funcionamiento del motor de inducción asíncrono.

4.5. Motivación de los estudiantes

La motivación y satisfacción percibida se evaluaron empleando un cuestionario de escala Likert de 1 a 5 basado en el modelo ARCS de Keller (1987), que considera la Atención, la Relevancia, la Confianza y la Satisfacción como dimensiones clave del compromiso con la tarea de aprendizaje. En la Tabla 10 se detallan las puntuaciones medias para cada dimensión en los cuatro grupos de estudio.

Tabla 10

Resultados de la motivación (modelo ARCS) en la fase post-test.

Grupo	Atención (A)	Relevancia (R)	Confianza (C)	Satisfacción (S)	ARCS Global
GE	4.32 ± .47	4.2 ± .42	4.18 ± .4	4.35 ± .38	4.26 ± .32
GC1	3.86 ± .51	3.9 ± .56	3.72 ± .48	3.78 ± .50	3.81 ± .46
GC2	4.1 ± .44	4.06 ± .4	4.05 ± .42	4.11 ± .41	4.08 ± .39
GC3	3.94 ± .47	4.01 ± .46	3.96 ± .45	3.92 ± .44	3.96 ± .43

El análisis ANOVA confirmó diferencias estadísticamente significativas en las dimensiones Atención ($F_{(3,76)} = 6.79, p < .01$), Relevancia ($F_{(3,76)} = 5.66, p < .01$), Confianza ($F_{(3,76)} = 5.1, p < .05$) y Satisfacción ($F_{(3,76)} = 6.02, p < 0.01$). El grupo GE presentó los puntajes más elevados en todas las dimensiones del cuestionario ARCS, destacando la capacidad de la RA para mantener la atención, contextualizar el contenido de manera relevante y generar confianza en la ejecución de las tareas prácticas.

4.6. Rendimiento en la prueba de contenido

El desempeño académico y la transferencia de los aprendizajes técnicos sobre motores de inducción asíncronos se midieron mediante la prueba de contenido diseñada por el equipo docente, compuesta por preguntas teóricas y ejercicios prácticos de aplicación, como se detalla en el apartado metodología. En la Tabla 11 se presenta la calificación global promedio de dicha prueba (escala de 0 a 10 puntos), así como la proporción de aciertos en los ejercicios prácticos de conexión estrella-triángulo y en el cálculo de corrientes y potencias.

Tabla 11*Resultados de la prueba de contenido.*

Grupo	Calificación global (0-10)	Aciertos en ejercicios prácticos (%)
GE	8.64 ± .77	88.3
GC1	7.38 ± .81	74.5
GC2	8.05 ± .82	82.7
GC3	7.9 ± .7	79.6

Los resultados indican que el GE obtuvo los valores más altos tanto en la calificación global como en la resolución de ejercicios prácticos, seguido por los grupos GC2 y GC3. El ANOVA mostró diferencias significativas en el puntaje final ($F_{(3,76)} = 9.01$, $p < .01$), con un tamaño del efecto ($\eta^2 = .26$) que sugiere un impacto moderado de la metodología RA sobre el rendimiento académico en contenidos de ingeniería eléctrica. Las comparaciones post hoc de Tukey revelaron diferencias significativas entre GE y GC1 ($p < .01$), así como entre GE y GC3 ($p < .05$), confirmando la superioridad del método basado en RA para facilitar la comprensión teórica y práctica del motor de inducción asíncrono.

4.7. Análisis correlacional y efectos conjuntos

Se exploraron las correlaciones de Pearson entre la carga cognitiva (NASA TLX), la motivación (ARCS), el rendimiento en habilidades espaciales (MRT, SVT) y la calificación en la prueba de contenido, previamente presentadas en la Tabla 6. Se constatan correlaciones inversas y significativas entre la NASA TLX y las variables académicas (MRT, SVT, ARCS, Calificación), así como correlaciones positivas y estadísticamente relevantes entre las habilidades espaciales y la calificación de la prueba de contenido.

Los coeficientes negativos entre NASA TLX y MRT/SVT ($r = -.58$, $r = -.5$) apoyan la hipótesis H_4 , al indicar que una menor carga cognitiva se traduce en mejores resultados en pruebas espaciales, lo que sugiere que los estudiantes que experimentan menor esfuerzo mental tienen una mayor capacidad para manipular mentalmente representaciones tridimensionales.

Asimismo, la correlación negativa entre NASA TLX y ARCS ($r = -.55$, $p < .01$) respalda la hipótesis H_2 , ya que indica que los estudiantes con menor carga cognitiva experimentan una mayor motivación en su proceso de aprendizaje, lo que refuerza la idea de que la RA facilita el aprendizaje al distribuir mejor la carga de procesamiento mental.

Por otro lado, la existencia de una fuerte correlación positiva entre ARCS y la prueba de contenido ($r = .63$, $p < .01$) valida la hipótesis H_3 , en tanto que una elevación de la motivación produce directamente un mayor rendimiento académico, es decir, que los alumnos más implicados con la actividad didáctica pueden lograr un aprendizaje más significativo y efectivo.

Finalmente, la asociación positiva entre MRT/SVT y la prueba de contenido ($r = .65$ y $r = .54$, respectivamente) valida la hipótesis H_1 , de forma que los estudiantes con mejores habilidades espaciales obtienen unas mejores notas en la evaluación final, lo cual pone de relieve la relevancia del desarrollo de estas competencias en la enseñanza de ingeniería eléctrica.

Asimismo, se llevó a cabo un ANCOVA en el que se controlaron diferencias en cuanto a la familiaridad con las herramientas digitales y los conocimientos previos (Tabla 7). El ajuste del modelo no alteró la significancia estadística del método didáctico sobre las variables de resultado, lo cual refuerza los hallazgos y se corrobora que la RA es el factor principal determinante en la mejora del rendimiento y la motivación del alumnado.

5. Discusión

Los hallazgos que se obtienen de esta investigación consiguen establecer evidencias sobre la eficacia de la RA como recurso didáctico para abordar el aprendizaje de contenidos técnicos de ingeniería eléctrica, concretamente en el desarrollo de habilidades espaciales, en la disminución de la carga cognitiva y en la mejora de los niveles de motivación en el alumnado.

Uno de los hallazgos más importantes que se extrae del presente trabajo es el efecto positivo que posee la RA en el desarrollo de las habilidades espaciales, que se han medido a partir de la utilización de las pruebas estandarizadas MRT y SVT. Se ha constatado la existencia de una mejora en el GE, que realizó RA con smartphones para visualizar interactivamente un motor con inducción asíncrona, en relación con los GC en las dos pruebas. Las diferencias encontradas son estadísticamente significativas, además de tener tamaños del efecto relevantes, lo cual evidencia que la RA genera unas condiciones más adecuadas para incentivar los procesos de rotación mental, visualización de representaciones tridimensionales, así como la manipulación espacial. Esta afirmación se relaciona con los resultados de Singh et al. (2019), para los cuales los entornos aumentados en laboratorios de electrónica permiten obtener una mejora significativa en las habilidades especiales de los estudiantes. En la misma línea, la investigación de Thees et al. (2020) indica que los laboratorios remotos con RA son capaces de conectar la interacción física con los modelos virtuales, lo que beneficia el aprendizaje espacial por parte de los estudiantes de conceptos de automatización y control industrial (Fidan y Tuncel, 2019).

Desde el punto de vista cognitivo, dado que la RA evidenció una clara disminución de la carga cognitiva que los participantes percibieron, evaluada mediante la escala NASA TLX, el resultado valida la hipótesis H₂ que sustentaba el estudio, de la misma manera que la Teoría de la Carga Cognitiva de Sweller y Chandler (1991) que indican que un buen diseño para el aprendizaje requiere la minimización de la carga extrínseca con el fin de dejar paso a la carga germinal. La RA en nuestra investigación promovió la distribución de la información entre varios canales sensoriales: visual, espacial y auditivo, para dar lugar al procesamiento paralelo de los conocimientos. Ya había sido detectado por Kapici et al. (2019) que la RA en el manejo de equipos electrónicos de medida como osciloscopios y generadores, reduce notablemente la carga cognitiva de los estudiantes. También, Bogusevschi et al. (2020) evidenció que la interacción con modelos aumentados conlleva una disminución apreciable del esfuerzo mental recibido. Los efectos que describen Mejías Borrego y Andújar Márquez (2011) en el caso de la enseñanza del electromagnetismo fueron similares; concluyeron que la visualización tridimensional favorece la construcción de modelos mentales y reduce la carga de la memoria de trabajo. Además, la investigación previa ya ha demostrado el potencial de los entornos aumentados como sistemas de apoyo cognitivo a través de la retroalimentación inmediata (del Cerro & Morales, 2017).

Las correlaciones y los análisis de covarianza realizados en este estudio también corroboran la existencia de una relación inversa y significativa entre el nivel de inteligencia espacial y la carga cognitiva, así como una correlación positiva entre motivación y la prueba de contenido. Por lo tanto, los resultados obtenidos validan la hipótesis H_4 y refuerzan la afirmación de que la RA no solo influye en variables aisladas, sino que también tiene un impacto significativo en factores cognitivos, motivacionales y de rendimiento. El mismo tipo de relación va en línea de los hallazgos de Ibáñez y Delgado-Kloos (2018), quienes indican que los estudiantes con mayor motivación intrínseca tienden a lograr una mejor retención de conceptos y rendir con mayor precisión en tareas prácticas. Bautista et al. (2025) también llegaron a la conclusión de que la motivación que produce la RA no solo contribuye a una mejor predisposición hacia el aprendizaje, sino que provoca efectos cuantificables en el pensamiento crítico y el rendimiento académico (Marini et al., 2022; Yang et al., 2023).

Respecto a la prueba académica del contenido se constata que el GE tiene un rendimiento significativamente mejor al de los tres GC. Este dato demuestra y reafirma la hipótesis H_1 que asume que la RA favorece la transferencia del saber del plano teórico al práctico, tal como han argumentado múltiples estudios. Morales y del Cerro (2024) indicaron en su estudio que los estudiantes que usaron RA en los entornos de formación industrial mejoraron sus capacidades para aplicar los conceptos técnicos en la resolución de problemas reales. En la misma línea, Kim e Irizarry (2021) indican que los entornos aumentados favorecen el alumnado a realizar procedimientos complejos de instalación eléctrica mejorando la precisión y disminuyendo el índice de error, que coincide con los hallazgos obtenidos en este estudio sobre el montaje y análisis del motor de inducción en configuración estrella-triángulo.

Desde una perspectiva metodológica, el estudio evidenció la viabilidad pedagógica y técnica de la RA en dispositivos móviles, tal y como sostiene la hipótesis H_5 . La implementación de la RA con Unity y Vuforia ofreció medios accesibles, flexibles y de bajo coste que apuntan a la escalabilidad de esta tecnología en la educación técnica superior. Asham et al. (2023) proponen que el uso de tecnologías móviles puede ayudar a cerrar la brecha de acceso a los entornos inmersivos para la integración curricular durante la etapa universitaria y en los institutos tecnológicos. Son varios los trabajos (Chen et al., 2019; Achachagua & Chinchay, 2022) que ponen de manifiesto que las aplicaciones de RA móvil son capaces de replicar con alta fidelidad las prácticas de laboratorio incluso en contextos de educación a distancia o que cuentan con equipamiento de laboratorio limitado.

6. Conclusiones

La investigación estudia el efecto de la RA en las habilidades espaciales de los estudiantes de ingeniería eléctrica y compara su aplicabilidad como método de aprendizaje con documentos digitales, simuladores tridimensionales y laboratorios. Los resultados muestran que la implementación de la RA mediante dispositivos móviles tiene efectos claramente positivos en el aprendizaje STEM, concretamente en ingeniería, la representación de objetos espaciales y la manipulación mental de objetos tridimensionales. La interacción con entornos aumentados mejoró las habilidades espaciales de los estudiantes considerablemente más que la CG. Además, la interactividad inmersiva de la RA es beneficiosa para los procesos cognitivos relacionados con la rotación mental y la representación de objetos espaciales, ya que reduce el esfuerzo cognitivo de los estudiantes.

Desde una perspectiva motivacional, los estudiantes que utilizaron la RA mostraron mayor atención, relevancia, confianza y satisfacción en comparación con los que utilizaron métodos tradicionales. El aumento de la percepción de la capacidad de aprendizaje y la mayor motivación intrínseca tuvieron un impacto directo en el rendimiento académico.

La viabilidad técnica y pedagógica de la RA también ha quedado demostrada, destacando su facilidad de implementación a través de plataformas como Unity y Vuforia, que son efectivas, escalables y económicamente viables para su adopción en los planes de estudios técnicos universitarios. Por lo tanto, la RA se considera una herramienta educativa con un potencial único para mejorar las habilidades espaciales, reducir la carga cognitiva y aumentar la motivación, lo que proporciona ventajas tangibles para la formación en ingeniería eléctrica y otras disciplinas STEM.

Por otro lado, se identifican limitaciones relacionadas con el tamaño de la muestra y la duración de la intervención, lo que limita la posible generalización de los resultados. Asimismo, el estudio se limitó únicamente a estudiantes de ingeniería eléctrica, esto sugiere que se necesitan más estudios para explorar el potencial de la RA en contextos relacionados con la educación STEM.

En última instancia, las futuras direcciones de la investigación apuntan a la propuesta de nuevos estudios con muestras más amplias e intervenciones más prolongadas, así como a la exploración del efecto de la RA en el aprendizaje y la retención de conocimientos a largo plazo. Otra vía de investigación es replicar el estudio integrando otras tecnologías emergentes para comparar las mejores prácticas y metodologías en la educación superior.

Material complementario

El conjunto de datos utilizados en este estudio están disponible previa solicitud razonables al autor de correspondencia.

Aprobación ética

No se aplica

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés

Referencias

- Achachagua, Y. H. Y., & Chinchay, H. E. G. (2022). La realidad aumentada y su efecto en la habilidad espacial de estudiantes de ingeniería mecánica. *Revista de Educación a Distancia (RED)*, 22(70). <https://doi.org/10.6018/red.509931>
- Ahn, S., Kim, T., Park, Y. J., & Kim, J. M. (2020). Improving effectiveness of safety training at construction worksite using 3D BIM simulation. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1), 2473138. <https://doi.org/10.1155/2020/2473138>
- Álvarez-Marín, A., & Velazquez-Iturbide, J. A. (2022). Augmented reality and engineering education: A systematic review. *IEEE transactions on learning technologies*, 14(6), 817-831. <https://doi.org/10.1109/TLT.2022.3144356>
- Alzahrani, N. M. (2020). Augmented reality: A systematic review of its benefits and challenges in e-learning contexts. *Applied sciences*, 10(16), 5660. <https://doi.org/10.3390/app10165660>

- An, J., Poly, L. P., & Holme, T. A. (2019). Usability testing and the development of an augmented reality application for laboratory learning. *Journal of Chemical Education*, 97(1), 97-105. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00453>
- Arena, F., Collotta, M., Pau, G., & Termine, F. (2022). An overview of augmented reality. *Computers*, 11(2), 28. <https://doi.org/10.3390/computers11020028>
- Ariali, S. (2020). Training of mental rotation ability in virtual spaces. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 8(2), 46-63. <https://doi.org/10.48513/joted.v8i2.207>
- Asham, Y., Bakr, M. H., & Emadi, A. (2023). Applications of Augmented and Virtual Reality in Electrical Engineering Education: A Review. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3337394>
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(4), 355-385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- Bautista, L. E., Maradei, F., & Pedraza, G. (2025). Análisis de la Disposición Espacial de Contenido en entornos de Realidad Aumentada y su Efecto en la Carga Cognitiva de los Usuarios. *Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación*. <https://doi.org/10.12795/pixelbit.109089>
- Bogomolova, K., van der Ham, I. J., Dankbaar, M. E., van den Broek, W. W., Hovius, S. E., van der Hage, J. A., & Hierck, B. P. (2020). The effect of stereoscopic augmented reality visualization on learning anatomy and the modifying effect of visual-spatial abilities: A double-center randomized controlled trial. *Anatomical sciences education*, 13(5), 558-567. <https://doi.org/10.1002/ase.1941>
- Bogusevski, D., Muntean, C., & Muntean, G. M. (2020). Teaching and learning physics using 3D virtual learning environment: A case study of combined virtual reality and virtual laboratory in secondary school. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, 39(1), 5-18. <https://doi.org/10.70725/297454nsjryb>
- Bourbour, M. (2023). Using digital technology in early education teaching: learning from teachers' teaching practice with interactive whiteboard. *International Journal of Early Years Education*, 31(1), 269-286. <https://doi.org/10.1080/09669760.2020.1848523>
- Branoff, T. J. (2000). Spatial visualization measurement: A modification of the Purdue Spatial Visualization Test—visualization of rotations. *The Engineering Design Graphics Journal*, 64(2). <https://doi.org/10.18260/edgj.v64i2.145>
- Brown, A. M. (2005). A new software for carrying out one-way ANOVA post hoc tests. *Computer methods and programs in biomedicine*, 79(1), 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2005.02.007>
- Buchner, J., Buntins, K., & Kerres, M. (2022). The impact of augmented reality on cognitive load and performance: A systematic review. *Journal of Computer Assisted Learning*, 38(1), 285-303. <https://doi.org/10.1111/jcal.12617>
- Chen, Y., Wang, Q., Chen, H., Song, X., Tang, H., & Tian, M. (2019). An overview of augmented reality technology. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1237, No. 2, p. 022082). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1237/2/022082>

- Chen, L., Wang, X., Min, Y., Li, G., Wang, L., Qi, J., & Xu, F. (2020). Modelling and investigating the impact of asynchronous inertia of induction motor on power system frequency response. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 117, 105708. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105708>
- Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297-334. <https://doi.org/10.1007/BF02310555>
- del Cerro Velázquez, F., & Morales Méndez, G. (2017). Realidad Aumentada como herramienta de mejora de la inteligencia espacial en estudiantes de educación secundaria. *Revista de Educación a Distancia (RED)*, (54). <http://dx.doi.org/10.6018/red/54/5>
- del Cerro Velázquez, F., & Morales Méndez, G. (2021). Systematic review of the development of spatial intelligence through augmented reality in stem knowledge areas. *Mathematics*, 9(23), 3067. <https://doi.org/10.3390/math9233067>
- Elford, D., Lancaster, S. J., & Jones, G. A. (2022). Exploring the effect of augmented reality on cognitive load, attitude, spatial ability, and stereochemical perception. *Journal of Science Education and Technology*, 31(3), 322-339. <https://doi.org/10.1007/s10956-022-09957-0>
- Fidan, M., & Tuncel, M. (2019). Integrating augmented reality into problem-based learning: The effects on learning achievement and attitude in physics education. *Computers & Education*, 142, 103635. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103635>
- García, F. M., Rojas, L. E. B., & Pedraza, G. (2023). Carga cognitiva y esfuerzo mental durante el cambio de contexto en entornos de realidad aumentada con fines de aprendizaje procedimental. *Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación*, 68, 305-340. <https://doi.org/10.12795/pixelbit.97479>
- Garzón, J., Kinshuk, Baldiris, S., & Fabregat, R. (2019). Systematic review and meta-analysis of augmented reality in educational settings. *Virtual Reality*, 23(4), 447–459. <https://doi.org/10.1007/s10055-019-00379-9>
- Guillén-Gámez, F. D., Cabero-Almenara, J., Llorente-Cejudo, C., & Palacios-Rodríguez, A. (2022). Differential analysis of the years of experience of higher education teachers, their digital competence and use of digital resources: Comparative research methods. *Technology, Knowledge and Learning*, 27(4), 1193-1213. <https://doi.org/10.1007/s10758-021-09531-4>
- Hart, S. G. (2006). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 50, No. 9, pp. 904-908). Sage CA: Los Angeles, CA: Sage publications. <https://doi.org/10.1177/154193120605000909>
- Ibáñez, M. B., & Delgado-Kloos, C. (2018). Augmented reality for STEM learning: A systematic review. *Computers & Education*, 123, 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.05.002>
- Ismail, A., Festiana, I., Hartini, T. I., Yusal, Y., & Malik, A. (2019). Enhancing students' conceptual understanding of electricity using learning media-based augmented reality. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1157, No. 3, p. 032049). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1157/3/032049>

- Kanivets, O. V., Kanivets, I. M., & Gorda, T. M. (2022). Development of an augmented reality mobile physics application to study electric circuits. *Educational Technology Quarterly*, 2022(4), 347-365. <https://doi.org/10.55056/etq.429>
- Kapici, H. O., Akcay, H., & de Jong, T. (2019). Using hands-on and virtual laboratories alone or together—which works better for acquiring knowledge and skills?. *Journal of science education and technology*, 28(3), 231-250. <https://doi.org/10.1007/s10956-018-9762-0>
- Keller, J. M. (1987). Development and use of the ARCS model of motivational design. *Journal of Instructional Development*, 10(3), 2–10. <https://doi.org/10.1007/BF02905780>
- Keselman, H. J., Huberty, C. J., Lix, L. M., Olejnik, S., Cribbie, R. A., Donahue, B., ... & Levin, J. R. (1998). Statistical practices of educational researchers: An analysis of their ANOVA, MANOVA, and ANCOVA analyses. *Review of educational research*, 68(3), 350-386. <https://doi.org/10.3102/00346543068003350>
- Kim, J., & Irizarry, J. (2021). Evaluating the use of augmented reality technology to improve construction management student's spatial skills. *International Journal of Construction Education and Research*, 17(2), 99-116. <https://doi.org/10.1080/15578771.2020.1717680>
- Lorenzi-Cioldi, F. (1998). Group status and perceptions of homogeneity. *European review of social psychology*, 9(1), 31-75. <https://doi.org/10.1080/14792779843000045>
- Marini, A., Nafisah, S., Sekaringtyas, T., Safitri, D., Lestari, I., Suntari, Y., ... & Iskandar, R. (2022). Mobile augmented reality learning media with Metaverse to improve student learning outcomes in science class. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 16(7). <https://doi.org/10.3991/ijim.v16i07.25727>
- Martín-Gutiérrez, J., Fabiani, P., Benesova, W., Meneses, M. D., & Mora, C. E. (2015). Augmented reality to promote collaborative and autonomous learning in higher education. *Computers in Human Behavior*, 51, 752–761. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.11.093>
- Mejías Borrero, A., & Andújar Márquez, J. M. (2011). A Pilot Study of the Effectiveness of Augmented Reality to Enhance the Use of Remote Labs in Electrical Engineering Education. *Springer Science+Business Media, LLC*. <https://doi.org/10.1007/s10956-011-9345-9>
- Morales Méndez, G., & del Cerro Velázquez, F. (2024). Augmented reality in Industry 4.0 assistance and training areas: A systematic literature review and bibliometric analysis. *Electronics*, 13(6), 1147. <https://doi.org/10.3390/electronics13061147>
- O'Connor, M., Stowe, J., Potocnik, J., Giannotti, N., Murphy, S., & Rainford, L. (2021). 3D virtual reality simulation in radiography education: The students' experience. *Radiography*, 27(1), 208-214. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2020.07.017>
- Oguguo, B., Ezechukwu, R., Nannim, F., & Offor, K. (2023). Analysis of teachers in the use of digital resources in online teaching and assessment in COVID times. *Innoeduca. International journal of technology and educational innovation*, 9(1), 81-96. <https://doi.org/10.24310/innoeduca.2023.v9i1.15419>

- Papakostas, C., Troussas, C., Krouska, A., & Sgouropoulou, C. (2021). Exploration of augmented reality in spatial abilities training: a systematic literature review for the last decade. *Informatics in Education*, 20(1), 107-130. <http://dx.doi.org/10.15388/infedu.2021.06>
- Prasetya, F., Fortuna, A., Samala, A. D., Rawas, S., Mystakidis, S., Wulansari, R. E., & Kassymova, G. K. (2024). The impact of augmented reality learning experiences based on the motivational design model: A meta-analysis. *Social Sciences & Humanities Open*, 10, 100926. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2024.100926>
- Singh, G., Mantri, A., Sharma, O., & Dutta, R. (2019). Evaluating the impact of the augmented reality learning environment on electronics laboratory skills of engineering students. *Computers & Applications in Engineering Education*, 27(6), 1361–1375. <https://doi.org/10.1002/cae.22156>
- Slack, M. K., & Draugalis Jr, J. R. (2001). Establishing the internal and external validity of experimental studies. *American journal of health-system pharmacy*, 58(22), 2173-2181. <https://doi.org/10.1093/ajhp/58.22.2173>
- Sorby, S. A. (2009). Educational research in developing 3-D spatial skills for engineering students. *International Journal of Science Education*, 31(3), 459–480. <https://doi.org/10.1080/09500690802595839>
- Sweller, J., & Chandler, P. (1991). Evidence for cognitive load theory. *Cognition and instruction*, 8(4), 351-362. https://doi.org/10.1207/s1532690xcio804_5
- Tarasenko, R. O., Amelina, S. M., Semerikov, S. O., & Shynkaruk, V. D. (2021). Using interactive semantic networks as an augmented reality element in autonomous learning. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1946, No. 1, p. 012023). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1946/1/012023>
- Thees, M., Kapp, S., Strzys, M. P., Beil, F., Lukowicz, P., & Kuhn, J. (2020). Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses. *Computers in Human Behavior*, 108, 106316. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106316>
- Uttal, D. H., et al. (2013). The malleability of spatial skills: A meta-analysis of training studies. *Psychological Bulletin*, 139(2), 352–402. <https://doi.org/10.1037/a0028446>
- Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, 4, 599–604. <https://doi.org/10.2466/pms.1978.47.2.599>
- Yang, X., Mao, W., Hu, Y., Wang, J., Wan, X., & Fang, H. (2023). Does augmented reality help in industrial training? A comprehensive evaluation based on natural human behavior and knowledge retention. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 98, 103516. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2023.103516>

Como citar:

Morales Méndez, G., del Cerro Velázquez, F., & Lozano Avilés, A.B. (2026). Realidad aumentada en el aprendizaje de materias STEM: desarrollo de habilidades espaciales en la formación en ingeniería eléctrica [Augmented reality in STEM learning: developing spatial skills in electrical engineering training]. *Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación*, 75, Art. 3. <https://doi.org/10.12795/pixelbit.117934>