

## Artículo de Investigación

# CircuitAR: Augmented Reality App for Autonomous Assembly of Op-Amp Configurations

CircuitAR: App de Realidad Aumentada para Montaje Autónomo de configuraciones de Op-Amps

Gloria Mónica Martínez Aguilar;<sup>1\*</sup>  Vanessa Maribel Morales Ibarra <sup>2</sup>  , Eduardo Salazar Valle <sup>3</sup>  , Abel Sosa Escobedo <sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica de Torreón; [gmartinez@utt.edu.mx](mailto:gmartinez@utt.edu.mx)

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica de Torreón; [vmorales@utt.edu.mx](mailto:vmorales@utt.edu.mx)

<sup>3</sup> Universidad Tecnológica de Torreón; [esalazar@utt.edu.mx](mailto:esalazar@utt.edu.mx)

<sup>4</sup> Universidad Tecnológica de Torreón; [asosa@utt.edu.mx](mailto:asosa@utt.edu.mx)

Recibido: 15/11/2025

Aceptado: 11/12/2025

Fecha de Publicación: 18/12/2025

<https://doi.org/10.57173/ritc.v1n19a4>



Derechos de autor: © 2025

**Resumen:** La Industria 4.0 (I4.0) ha impulsado la Realidad Aumentada (AR) como apoyo a la enseñanza práctica en STEM; en este estudio se presenta el diseño y la evaluación de CircuitAR, una app móvil que superpone en 3D el armado correcto de ocho configuraciones básicas de amplificadores operacionales. El desarrollo siguió tres fases (configuración del entorno; creación de *Image Targets* y modelos 3D; integración en Unity/Vuforia) y se evaluó en laboratorio comparando método tradicional vs. guía con AR, registrando tiempo de montaje, errores críticos de cableado y usabilidad (SUS). Los resultados muestran que la app eliminó los errores críticos en las tres dificultades analizadas; en cambio, el tiempo de montaje no se redujo de forma sistemática —aumentó en tareas básica e intermedia y mostró una ligera mejora en la de alta—, en parte por un tiempo de verificación antes de entregar. La usabilidad percibida fue alta (SUS ≈ 80.8/100). En conjunto, CircuitAR estandariza el montaje y mejora la calidad del trabajo; en el marco de la Educación 4.0, proponemos asistencia escalonada y optimización del flujo para acercar la eficiencia temporal al método tradicional y escalar su aplicación a contenidos de mayor complejidad y a más cursos de ingeniería.

**Palabras clave:** Realidad Aumentada; Amplificadores operacionales; Educación 4.0.

**Abstract:** Industry 4.0 (I4.0) has driven the use of Augmented Reality (AR) to support hands-on teaching in STEM; this study presents the design and evaluation of CircuitAR, a mobile app that overlays in 3D the correct assembly of eight basic operational-amplifier configurations. Development followed three phases (environment setup; creation of Image Targets and 3D models; integration in Unity/Vuforia) and was evaluated in the lab by comparing the traditional method vs. AR-guided assembly, recording assembly time, critical wiring errors, and usability (SUS). Results show that the app eliminated critical errors across the three difficulty levels; however, assembly time was not systematically reduced—it increased for basic and intermediate tasks and showed a slight improvement for the advanced one—partly due to verification time before submission. Perceived usability was high (SUS ≈ 80.8/100). Overall, CircuitAR standardizes assembly and improves work quality; within the framework of Education 4.0, we propose scaffolded assistance and flow optimization to bring time efficiency closer to the traditional method and to scale its application to more complex content and additional engineering courses.

**Keywords:** Augmented Reality; operational-amplifier; Education 4.0.

## 1. Introducción

La Educación 4.0 (E4.0) surge de la convergencia entre la Industria 4.0 (I4.0) y las pedagogías activas, demandando entornos formativos que permitan al estudiante experimentar procesos industriales en su propio dispositivo móvil. En este sentido, la Realidad Aumentada (AR) se ha consolidado como una tecnología capaz de enriquecer significativamente la enseñanza en ingeniería al superponer modelos digitales interactivos sobre el mundo físico, lo que facilita la visualización de conexiones ocultas, la manipulación de componentes tridimensionales y la retroalimentación inmediata durante la resolución de problemas. Por ejemplo, se ha demostrado que una aplicación de AR para electrónica de potencia no solo mejora la comprensión espacial del estudiante, sino que también incrementa su motivación y autoeficacia al construir circuitos complejos en un protoboard virtual [1]. De manera complementaria, se presentó un flujo de trabajo en AR que integra la verificación automatizada de conexiones, lo que reduce errores de montaje y optimiza el tiempo de práctica en laboratorio [2]. Además, una revisión sistemática encontró que las aplicaciones de AR en diversas disciplinas de ingeniería mejoran la interacción del alumnado con el contenido y fomentan una implicación más profunda en proyectos prácticos, a la vez que identifican tendencias y brechas para futuras investigaciones [3].

En este sentido mediante la fusión de la teoría y práctica mediante AR en un único flujo de trabajo digital, se facilita la transferencia de conocimientos a entornos reales de ingeniería, promoviendo una experiencia de aprendizaje más coherente y motivadora, donde se prepara al estudiante para aplicar inmediatamente los conceptos adquiridos en su entorno académico y profesional. Las prácticas "*hands-on*" dejan de ser una actividad aislada y pasan a formar parte integral del proceso de aprendizaje, por ejemplo, el estudiante no solo visualiza el circuito en su dispositivo, sino que interactúa con componentes virtuales sobre el protoboard real, aplicando conceptos en tiempo real y consolidando habilidades motoras y procedimentales. Este enfoque integrado refuerza la memoria procedimental y mejora el razonamiento intuitivo, traduciéndose en una reducción de errores durante el ensamblaje y un aumento de la confianza del alumno en tareas de laboratorio remoto [4].

Este modelo de aprendizaje inmersivo cobra especial relevancia en las carreras STEM –Eléctrica, Electrónica, Mecatrónica y afines–, donde desde los primeros semestres los circuitos básicos (resistivos, RC, RLC y amplificadores operacionales) conforman el pilar imprescindible para materias más especializadas y avanzadas. Hasta ahora, la enseñanza de estos contenidos se ha basado en laboratorios presenciales, donde el estudiante arma un circuito dado, para posteriormente revisar su montaje con el docente. Cuando se detecta un error, este debe desmontar y volver a ensamblar –perdiendo valioso tiempo de clase y quedando a merced de la disponibilidad del profesor para recibir orientación. Esta falta de una guía interactiva permanente limita la autonomía del alumno y reduce la eficiencia del proceso de aprendizaje.

Aunque existen aplicaciones AR que permiten reforzar circuitos RLC y realizar mediciones básicas en protoboard virtuales [1,2], son muy pocas las que ofrecen una auto guía interactiva para el montaje real de amplificadores operacionales. En particular, ninguna de las plataformas actuales cubre de manera sistemática las configuraciones básicas de amplificadores operacionales (seguidor, inversor, sumador, restador, comparador, integrador, inversor y no inversor). Para cubrir esta brecha, este artículo amplía la metodología para el desarrollo de aplicaciones de AR en entornos de Educación

4.0 [5]. Asimismo, presentamos CircuitAR, una app móvil que superpone sobre el protoboard modelos 3D del armado correcto de ocho configuraciones básicas de amplificadores operacionales (Op-Amp). A través de *image targets*, la aplicación indica con precisión la posición y orientación de cada componente y las rutas de conexión, brindando una referencia espacial inequívoca. Esta guía 3D reduce errores críticos y retrabajo, evita rehacer montajes y libera tiempo de clase. CircuitAR no sustituye la práctica presencial: la complementa, al estandarizar el armado, fortalecer la autonomía del estudiante y permitir que el docente concentre la retroalimentación en el análisis e interpretación de resultados, logrando un laboratorio de electrónica analógica más predecible y seguro. Además, su implementación con *targets* impresos y dispositivos Android de gama media facilita la replicación en distintos cursos y contextos.

## 2. Materiales y métodos

A continuación, se presentan las principales herramientas *opensource* empleadas en el desarrollo de CircuitAR, garantizando transparencia, flexibilidad y total control sobre cada componente del sistema.

### 2.1 Herramientas Opensource

#### 2.1.1 Unity 3D

Unity 3D se ha consolidado como el motor de referencia para el desarrollo de experiencias inmersivas en dispositivos móviles, gracias a su política LTS (Long-Term Support) que garantiza estabilidad y actualizaciones continuas. Permite desplegar aplicaciones nativas en Android, iOS y WebGL, y ofrece un sistema robusto de gestión de escenas junto con un avanzado pipeline de *Physically Based Rendering* (PBR) que simula de forma realista la interacción de la luz con los materiales. Esto resulta esencial en Educación 4.0, ya que las simulaciones educativas requieren fidelidad visual y rendimiento óptimo para mantener el compromiso del estudiante [6].

#### 2.1.2 Vuforia SDK

Vuforia SDK es un paquete nativo de Unity para implementar reconocimiento y seguimiento de imágenes (*Image Targets*) con alta precisión y baja latencia, incluso bajo variaciones de iluminación y ángulo [7]. Esta robustez es esencial en entornos formativos de AR, ya que asegura que los modelos 3D permanezcan anclados al escenario físico, favoreciendo un flujo de trabajo *learning by doing* en el que lo digital y lo real se integran de forma fluida y coherente.

Los *Image Targets* son patrones visuales (imágenes impresas o digitales) que, al ser detectados por el SDK, sirven de punto de referencia para superponer modelos tridimensionales. Su coste de producción —una simple impresión— y su rápida actualización permiten a las instituciones educativas desplegar ejercicios prácticos de forma ágil y económica, ampliando el acceso a entornos de laboratorio inmersivos potenciados con AR [8].

#### 2.1.3 Tinkercad

Tinkercad es una plataforma de diseño asistido por computadora (CAD) basada en navegador que simplifica el modelado 3D de componentes electrónicos (resistencias, condensadores, circuitos) mediante una interfaz *drag-and-drop*. La exportación a formato

.obj genera ficheros ligeros compatibles con Unity y otros motores de AR, reduciendo la curva de aprendizaje en diseño 3D y acelerando la creación de contenido didáctico; se ha demostrado que el uso de Tinkercad en la enseñanza de robótica educativa mejora significativamente la eficiencia del prototipado y la satisfacción de los usuarios, mediante un análisis de usabilidad apoyado en técnicas de *eye-tracking* [9].

#### 2.1.4 Lean Touch

Lean Touch es un complemento para Unity que implementa gestos multitáctiles — arrastre, pellizco y rotación — con mínima configuración. La integración de gestos táctiles en aplicaciones de Realidad Aumentada móvil mejora significativamente la interacción y la exploración de modelos 3D, tal como se documentó en el estudio *Touch-Move-Release*, donde se analizaron gestos de superficie y de movimiento para AR en dispositivos móviles, evidenciando mejoras significativas en la precisión de interacción y en la satisfacción del usuario [10].

Con este conjunto de herramientas, los proyectos de E4.0 pueden ofrecer experiencias AR robustas, eficientes y accesibles, favoreciendo un aprendizaje práctico integrado y orientado a la adquisición de competencias técnicas en tiempo real.

### 2.2 Metodología

La metodología de desarrollo de CircuitAR sigue rigurosamente el protocolo descrito en [5] y se organiza en tres fases principales:

- A. Instalación de herramientas: Se parte de la instalación de Unity Hub, seleccionando la versión Unity 2019.4.35f1 e incluyendo los módulos para Android, iOS y WebGL. A continuación, se integra el Vuforia SDK para el reconocimiento de *targets* y se añade el paquete Lean Touch para habilitar gestos táctiles avanzados (arrastre, pellizco y rotación) dentro de la escena.
- B. Configuración de elementos de AR: Primero, se genera una licencia gratuita en el Vuforia *License Manager* y se crea la base de datos de *Image Targets* a partir de imágenes en alta resolución (.jpg/.png) que combinan el esquema visual de cada configuración de Op-Amp con una abreviatura distintiva (por ejemplo, “INV” para inversor, “SUM” para sumador, etc.), de modo que cada *target* sea inmediatamente reconocible y representativo del circuito correspondiente. Paralelamente, los modelos tridimensionales del protoboard y los componentes electrónicos (resistencias, condensadores, Op-Amps) se diseñan en Tinkercad y se exportan en formato .obj, garantizando geometrías optimizadas para dispositivos móviles.
- C. Construcción de la aplicación: Se inicia un nuevo proyecto en Unity 3D configurado para la plataforma Android. Se instala el Vuforia Engine, se importa la base de datos de *Image Targets* y se colocan los archivos .obj correspondientes en cada target. Finalmente, se configura el sistema de gestos con Lean Touch para permitir al usuario rotar y escalar los modelos, y se genera el paquete de instalación (.apk) listo para pruebas en dispositivo físico.

#### 2.2.1 Implementación y pruebas

Para evaluar la eficacia de CircuitAR, se realizó un piloto con 18 equipos de 3 integrantes (n = 54) de Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería en Mantenimiento Industrial,

usando dispositivos Android 9.0 de gama media en condiciones típicas de aula. Los equipos fueron seleccionados al azar, sin estratificar por experiencia previa en armado de protoboard (la muestra incluyó estudiantes con y sin conocimientos previos). La prueba se estratificó por dificultad de la configuración: grupos 1–6 trabajaron con seguidor (baja), grupos 7–13 con inversor (intermedia) y grupos 14–18 con sumador (alta). Dentro de cada nivel de dificultad, los equipos fueron asignados aleatoriamente a una de dos condiciones entre-grupos: método tradicional o método con app, de modo que cada equipo realizó un solo montaje en su configuración correspondiente.

La aplicación no valida conexiones ni emite retroalimentación automática; su función es superponer en AR el armado correcto sobre el protoboard utilizando un *image targets* que se les proporciona en una hoja de práctica. El tiempo de montaje se cronometró desde la primera conexión hasta que el equipo declaró el circuito listo para revisión, incluyendo cualquier verificación visual con AR previa a la entrega en la condición con app. Todas las variables se analizaron como media  $\pm$  desviación estándar, y la mejora porcentual se definió como  $((\text{Tradicional-App}) / \text{Tradicional}) \times 100$ , donde valores negativos indican mayor tiempo en la condición con app. Se emplearon tres métricas para cuantificar el impacto:

- ❖ Tiempo de montaje (min): intervalo medido con cronómetro desde la primera conexión hasta la declaración de circuito listo para revisión.
- ❖ Tasa de errores en conexiones críticas (número de fallos): recuento de errores de cableado que comprometen el funcionamiento del Op-Amp, por intento y condición.
- ❖ Percepción de usabilidad (SUS, 0–100): al finalizar ambas condiciones, los participantes completaron la *System Usability Scale* (10 ítems, Likert 1–5). Donde se estimó la media  $\pm$  desviación estándar, además del IC 95 % de la media mediante t de Student ( $gl = 25$ ).

En la figura 1 se encuentra la encuesta SUS aplicada a los estudiantes.



**Figura 1.** QR de SUS para evaluación de CircuitAR.

La elección de estas métricas se sustenta en evidencia previa sobre AR aplicada al montaje asistido. En primer lugar, el tiempo de montaje: las instrucciones 3D superpuestas pueden reducirlo en más de un 25 %. En segundo lugar, la tasa de errores en conexiones críticas: se ha reportado disminuciones de hasta un 32 % cuando los usuarios siguieron indicaciones visuales [11]. En tercer lugar, la percepción de usabilidad, medida con SUS, instrumento validado como fiable ( $\alpha > 0.85$ ) y rápido de aplicar (5–7 min) en aplicaciones de AR [12]. Con estos procedimientos de recogida de datos cuantitativos y cualitativos, la Metodología establece un marco riguroso para evaluar la eficiencia, precisión y aceptación de CircuitAR.

### 3. Resultados

#### 3.1 Funcionalidad y diseño de la aplicación

La experiencia de uso de CircuitAR se sustenta en una interfaz intuitiva y coherente, comenzando por un ícono distintivo (Figura 2) que combina un triángulo estilizado de amplificador operacional con las letras “CircuitAR”, el cual todos los participantes (100 %) identificaron de inmediato como una aplicación de AR para electrónica, facilitando su acceso en el dispositivo. Para la detección de circuitos, se diseñaron ocho *Targets* que incorporan el esquema visual de cada configuración junto a una abreviatura representativa (Figura 3). Durante las pruebas de funcionalidad, a cada alumno se le entregó una hoja de práctica que describe paso a paso el ensamblaje de cada circuito. En la primera fase, debían seguir únicamente las instrucciones escritas para completar el montaje de manera convencional. En la fase con la aplicación, además de la hoja de práctica, se les proporcionó la imagen del target impresa; al escanearla con su dispositivo, la app desplegaba en AR la configuración exacta que debían armar, permitiéndoles comparar constantemente su progreso con la guía visual.

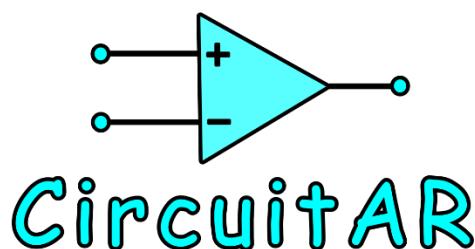


Figura 2. Ícono de CircuitAR.

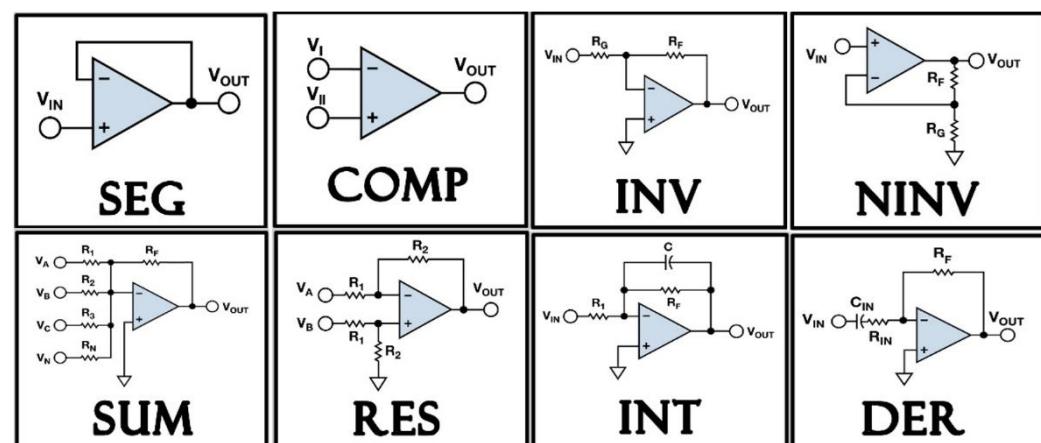


Figura 3. Image Targets utilizados en CircuitAR.

#### 3.2 Eficiencia y precisión

La Tabla 1 resume los hallazgos del piloto, comparando el método tradicional con CircuitAR por nivel de dificultad (seguidor, inversor y sumador) y en el global, e incorporando la evaluación de usabilidad (SUS).

**Tabla 1.** Resultados pruebas piloto con y sin CircuitAR.

Métrica	Básica (Seguidor)	Intermedia (Inversor)	Alta (Sumador)	Global
<b>Tiempo tradicional (min)</b>	$2.53 \pm 0.20$	$8.20 \pm 3.24$	$2.60 \pm 1.33$	$4.44 \pm 3.09$
<b>Tiempo app (min)</b>	$3.03 \pm 1.20$	$12.42 \pm 1.34$	$2.55 \pm 0.74$	$6.00 \pm 3.16$
<b>Mejora tiempo</b>	-20 %	-52 %	+2 %	-35 %
<b>Errores tradicional (n)</b>	$0.00 \pm 0.00$	$0.62 \pm 1.80$	$0.40 \pm 0.69$	$0.33 \pm 0.71$
<b>Errores app (n)</b>	$0.00 \pm 0.00$	$0.00 \pm 0.00$	$0.00 \pm 0.00$	$0.00 \pm 0.00$
<b>Mejora errores</b>	—	100 %	100 %	100 %
<b>Sus app (0–100)</b>	—	—	—	$80.77 \pm 19.80$

Nota: DE = desviación estándar; n = 3 equipos por dificultad (global n = 9); SUS solo global (n = 26) donde “Media ± DE” es descriptivo y puede sobrepasar 100 al sumarse; no implica puntuaciones >100.

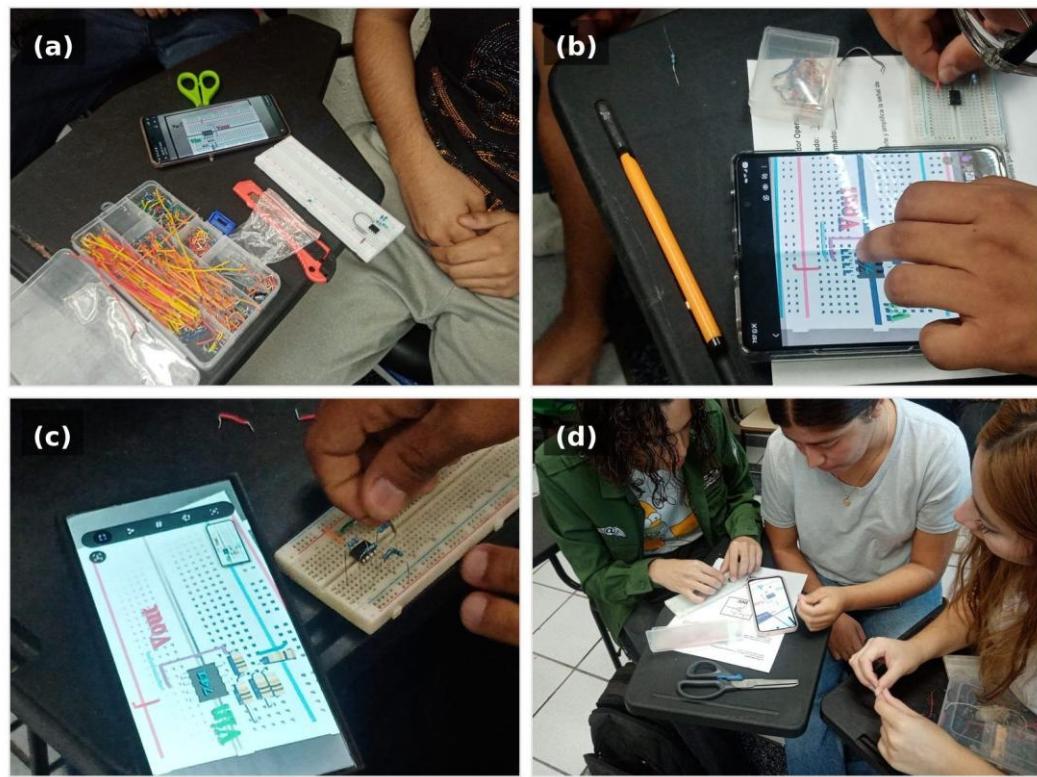
En el tiempo de montaje se observó un comportamiento heterogéneo según la dificultad: en la configuración del seguidor (básica) el tiempo fue mayor con la app (2.53 → 3.03 min; -20 %), en la del inversor (intermedia) también aumentó (8.20 → 12.42 min; -52 %), mientras que en la del sumador (alta) la app fue ligeramente más rápida (2.60 → 2.55 min; +2 %). En el conjunto global, se observó un incremento del tiempo con la app (4.44 → 6.00 min; -35 %). Este patrón es coherente con el flujo real de trabajo observado: el uso de AR añade pasos de apertura/encuadre del *target* y, en varios equipos, un tiempo deliberado de verificación visual antes de entregar el montaje; ese intervalo se contabilizó dentro del tiempo total. Además, en la configuración del inversor —con mayor número de conexiones que seguidor— la necesidad de orientar el protoboard y alinear el marcador con el modelo 3D incrementó el tiempo operativo; en cambio, en la configuración del sumador la guía de la app pareció compensar ese sobrecosto, mostrando una ligera mejora neta.

Con respecto a la precisión, la tasa de errores críticos se redujo a cero con la app en los tres niveles de dificultad (global:  $0.33 \pm 0.71 \rightarrow 0.00 \pm 0.00$ ; 100 % de mejora), lo que evidencia un efecto consistente de estandarización del montaje. La superposición 3D de la configuración —con pines del Op-Amp, rieles de alimentación y ubicación de componentes— disminuyó ambigüedades típicas (polaridad, inversión de entradas, conexiones cruzadas), alineando la construcción física con el diseño objetivo.

En usabilidad, CircuitAR obtuvo  $80.77 \pm 19.80$  puntos SUS (IC 95 %: [72.77; 88.77]; mediana = 86.25; rango = 10–100; n = 26), lo que indica una alta aceptación percibida de la app. Aunque la desviación estándar sugiere variabilidad entre equipos (previsiblemente asociada a la familiaridad con AR/targets y a la experiencia previa en protoboard), la media sitúa a la app en un rango de buena usabilidad para su adopción en aula. Entre los factores positivos observados se incluyen la claridad del ícono y navegación, y el mapeo directo entre el modelo 3D y el protoboard real; como oportunidad de mejora, reducir pasos de encuadre y precargar los targets por configuración podría disminuir el tiempo de armado.

En conjunto, los resultados confirman una compensación (*trade-off*): CircuitAR elimina los errores críticos y es bien aceptada por los estudiantes, pero no siempre reduce el tiempo de montaje —especialmente en tareas de dificultad intermedia— debido al costo operativo (apertura y encuadre del *target*) y a la verificación adicional que los propios equipos decidieron realizar. Estas tendencias, ilustradas en la Figura 4, sustentan el papel de la app como apoyo formativo que prioriza la precisión y la comprensión espacial. De cara a iteraciones futuras, optimizar el flujo de uso (p. ej., minimizar el tiempo de encuadre, ajustar el nivel de guía según la dificultad y diferenciar explícitamente el tiempo

de armado del tiempo de verificación) debería acercar la eficiencia temporal al método tradicional sin sacrificar el beneficio en calidad del montaje.



**Figura 4.** Secuencia de uso de CircuitAR durante la prueba piloto: (a) materiales de la práctica (protoboard, jumpers y dispositivo móvil); (b) consulta de la guía AR con marcador por configuración; (c) comparación continua entre la superposición 3D y el protoboard físico durante el cableado; (d) entrega del montaje final por el equipo. La verificación visual previa a la entrega explica parte del aumento del tiempo con la app, consistente con la reducción a cero de los errores críticos.

En síntesis, los datos muestran que la principal fortaleza de CircuitAR es la estandarización del montaje y la eliminación de errores, con una usabilidad percibida alta; el incremento de tiempo observado refleja prácticas de verificación consciente que, si se gestionan con mejoras de flujo, podrían traducirse en eficiencia comparable a la del método tradicional. Estos elementos enmarcan la discusión sobre cómo y en qué condiciones la guía AR aporta mayor valor pedagógico en laboratorios de electrónica.

#### 4. Discusión

Los resultados del piloto con CircuitAR confirman que la incorporación de una guía interactiva en AR transforma la dinámica del laboratorio de electrónica, alineándose con la evidencia de que estas tecnologías promueven un aprendizaje activo y significativo. En nuestro caso, la app eliminó los errores críticos en todos los niveles de dificultad, mientras que el tiempo de montaje no se redujo de forma sistemática (aumentó en seguidor e inversor y solo mostró una ligera mejora en sumador). Este patrón es compatible con la literatura que sostiene que la posibilidad de “ver antes de hacer” favorece la comprensión y disminuye la incertidumbre del estudiante [13], al tiempo que puede introducir pasos operativos adicionales (encuadre y verificación) que explican el comportamiento temporal observado; además, esa visualización previa ayuda a mitigar la ansiedad por equivocarse, como señalan [14].

La usabilidad percibida fue alta ( $SUS = 80.77 \pm 19.80$ ), lo que respalda que los estudiantes, habituados a interfaces móviles táctiles, valoran positivamente aplicaciones AR que presentan la información de manera clara y progresiva. Un estudio mostró que incorporar guías visuales adaptativas en AR reduce la carga cognitiva al resaltar los elementos esenciales para la tarea [15]; si bien nuestra implementación no incluyó adaptación del nivel de guía, los hallazgos sugieren que su incorporación podría disminuir la carga y acortar tiempos sin perder precisión.

No obstante, conviene reconocer que una presentación excesiva de elementos visuales puede generar sobrecarga cognitiva, compitiendo por la atención del alumno y dificultando el desarrollo de habilidades manuales. Se ha documentado que, aunque la AR suele reducir la carga frente a medios tradicionales, un exceso de estímulos puede anular estos beneficios [16]. Para mitigar este riesgo, como un trabajo a futuro se propone una asistencia escalonada coherente con la Teoría de la Carga Cognitiva: iniciar con una guía esencial que resalte únicamente nodos y conexiones críticas (minimizando la carga extrínseca) y habilitar capas opcionales —p. ej., instrucciones paso a paso, animaciones de ruteo y listas de verificación— que el estudiante active según su dominio. Así, cada usuario autorregularía la cantidad de información visible y evitaría distracciones innecesarias [17]. Asimismo, ampliar CircuitAR a circuitos más complejos y evaluar su uso en otros programas educativos será clave para validar su versatilidad y escalar la innovación a todo el ámbito STEM; la adaptación de las guías a distintos perfiles y contextos es, de hecho, condición para una adopción sostenible [13].

En definitiva, la integración de AR como complemento al laboratorio presencial no implica sustituir la práctica física, sino enriquecerla: al ofrecer referencias visuales inmediatas que el estudiante puede auto gestionar, CircuitAR potencia la autonomía y la confianza y estandariza el armado, lo que la convierte en una herramienta prometedora para la Educación 4.0, con oportunidades claras de optimización del flujo para aproximar su eficiencia temporal al método tradicional sin sacrificar la calidad del montaje.

## 5. Conclusiones

Las pruebas piloto mostraron que CircuitAR es una vía viable y efectiva para estandarizar el montaje de circuitos básicos con amplificadores operacionales en laboratorio, al ofrecer una representación espacial clara de conexiones y disposición de componentes. La guía visual en AR permitió eliminar los errores críticos en las tres dificultades evaluadas y obtuvo una alta aceptación de uso ( $SUS$  media  $\approx 80.8/100$ ), lo que respalda su idoneidad pedagógica como apoyo a las prácticas presenciales.

Desde la perspectiva de diseño instruccional, el hallazgo central no es solo la precisión lograda, sino el tipo de apoyo que la app brinda: una referencia visual persistente que reduce ambigüedades en polaridad, inversión de entradas y ruteo, especialmente beneficiosa para estudiantes con menor experiencia en armado de circuitos en protoboard. Esta estandarización libera tiempo docente de corrección de errores básicos dando la posibilidad de reorientarlo hacia la interpretación de señales y el razonamiento de circuito.

En términos de eficiencia temporal, el estudio evidenció situaciones no previstas: el tiempo de verificación de los alumnos con la guía AR de los circuitos y el encuadre del *target*, las cuales añaden pasos al flujo de trabajo. Esto sugiere que la mejora de la precisión ha de ponderarse junto con el costo operativo de uso. De cara a su adopción, recomendamos prácticas simples que podrían acercar la eficiencia al método tradicional sin perder calidad: inducciones breves al inicio del curso, precarga de *targets* por configuración y asistencia escalonada (de guía esencial a pasos detallados según el nivel del estudiante).

A nivel de transferencia, la experiencia es replicable en contextos con recursos estándar (dispositivos Android de gama media y *targets* impresos), lo que facilita su incorporación en asignaturas de los primeros cuatrimestres y su articulación con cursos posteriores (p. ej., filtros activos, acondicionamiento y medición). Además, su uso favorece prácticas de evaluación formativa (observación del proceso, no solo del resultado), coherentes con entornos de Educación 4.0.

Como trabajo futuro, proponemos estudios con diseños contrabalanceados y estratificación por experiencia previa, la distinción explícita entre tiempo de armado y tiempo de verificación, y la extensión a circuitos de mayor complejidad y otras carreras de ingeniería, para evaluar generalización y transferibilidad. Integrar analíticas de uso (p. ej., tiempo por paso o consultas a la vista AR) permitirá afinar la guía y personalizarla al ritmo del alumnado.

En suma, CircuitAR no reemplaza la práctica física; la enriquece: ofrece una ruta clara para disminuir la variabilidad de errores, aumentar la confianza del estudiante y consolidar la comprensión espacial del circuito, sentando bases sólidas para escalar la innovación a más contenidos y grupos de estudiantes de diferentes áreas.

**Contribuciones de autor:** Conceptualización, Gloria Mónica Martínez Aguilar y Eduardo Salazar Valle; metodología, Gloria Mónica Martínez Aguilar; software, Gloria Mónica Martínez Aguilar y Abel Sosa Escobedo; validación, Vanessa Maribel Morales Ibarra y Eduardo Salazar Valle; análisis formal, Gloria Mónica Martínez Aguilar; investigación (piloto y recolección de datos), Vanessa Maribel Morales Ibarra y Eduardo Salazar Valle; recursos, Abel Sosa Escobedo y Eduardo Salazar Valle; curación de datos, Vanessa Maribel Morales Ibarra y Eduardo Salazar Valle; redacción—preparación del borrador original, Gloria Mónica Martínez Aguilar y Vanessa Maribel Morales Ibarra; redacción—revisión y edición, todos los autores; visualización (figuras y material gráfico), Gloria Mónica Martínez Aguilar; supervisión, Gloria Mónica Martínez Aguilar; administración de proyectos, Gloria Mónica Martínez Aguilar; adquisición de financiación, no aplica.

**Fondos:** Esta investigación no recibió financiamiento externo.

**Agradecimientos:** Agradecemos a las y los estudiantes que participaron en el piloto por su colaboración y retroalimentación; al personal de laboratorio por el apoyo logístico y técnico; y a quienes facilitaron materiales y espacio para las pruebas. Las imágenes utilizadas en las figuras se emplean con consentimiento informado de los participantes.

**Conflictos de interés:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## Referencias

- [1] Sandoval Pérez, S.; Gonzalez Lopez, J.M.; Villa Barba, M.A.; Jimenez Betancourt, R.O.; Molinar Solís, J.E.; Rosas Ornelas, J.L.; García, G.I.R.; Rodriguez Haro, F. On the use of augmented reality to reinforce the learning of power electronics for beginners. *Electronics* 2022, 11(3), 302. doi:10.3390/electronics11030302.
- [2] Aswin, A.; Anzar, S.M.; Subheesh, N.P.; John, A. Enhancing electronics education through augmented reality and automated circuit verification: A comprehensive workflow design. In: Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE); 2024. doi:10.1109/TALE62452.2024.10834354.
- [3] Suhail, N.; Bahroun, Z.; Ahmed, V. Augmented reality in engineering education: Enhancing learning and application. *Frontiers in Virtual Reality* 2024, 5, 1461145. doi:10.3389/frvir.2024.1461145.
- [4] AR4FSM: Mobile Augmented Reality Application in Engineering Education. *Education Sciences* 2022, 12(8), 555. doi:10.3390/educsci12080555.
- [5] Martínez-Aguilar, G.M.; Mota-Barragán, M.E.; Mendiola-García, Y.; Luna-González, G.J. Methodology for creating applications with augmented reality for education 4.0. *Journal Schools of Economic Thought and Methodology* 2022, 6–14. doi:10.35429/jsetm.2022.10.6.6.14.

- [6] Hiranyachattada, T.; Kusirirat, K. Using mobile augmented reality to enhancing students' conceptual understanding of physically-based rendering in 3D animation. *European Journal of Science and Mathematics Education* 2020, 8(1), 1–5. doi:10.30935/scimath/9542.
- [7] Mahato, K.; Ghosh, A.; Suman, U. Assessment of 3D models placement methods in augmented reality. *Applied Sciences* 2022, 12(20), 10620. doi:10.3390/app122010620.
- [8] Pattanapichet, F. Development of augmented reality-based object recognition mobile application with Vuforia. *Journal of Computer Science and Information Technology* 2022, 14(2), 47–55. Disponible en línea: [https://www.researchgate.net/publication/379537037\\_Development\\_of\\_Augmented\\_Reality-based\\_object\\_recognition\\_mobile\\_application\\_with\\_Vuforia](https://www.researchgate.net/publication/379537037_Development_of_Augmented_Reality-based_object_recognition_mobile_application_with_Vuforia) (consultado el 15 julio 2025).
- [9] Erdoğan, R.; Sağlam, Z.; Çetintav, G.; et al. Examination of the usability of Tinkercad application in educational robotics teaching by eye tracking technique. *Smart Learning Environments* 2023, 10, 27. doi:10.1186/s40561-023-00242-0.
- [10] Dong, Z.; Zhang, J.; Bai, X.; Clark, A.; Lindeman, R.W.; He, W.; Piumsomboon, T. Touch-Move-Release: Studies of surface and motion gestures for mobile augmented reality. *Frontiers in Virtual Reality* 2022, 3, 927258. doi:10.3389/frvir.2022.927258.
- [11] Morales-Méndez, G.; del Cerro Velázquez, F. Adaptive augmented reality architecture for optimising assistance and safety in Industry 4.0. *Big Data and Cognitive Computing* 2025, 9(5), 133. doi:10.3390/bdcc9050133.
- [12] Davidavičienė, V.; Raudeliūnienė, J.; Viršilaitė, R. Evaluation of user experience in augmented reality mobile applications. *Journal of Business Economics and Management* 2021, 22(2), 467–481. doi:10.3846/jbem.2020.13999.
- [13] Ibáñez, M.-B.; Delgado-Kloos, C. Augmented reality for STEM learning: A systematic review. *Computers & Education* 2018, 123, 109–123. doi:10.1016/j.compedu.2018.05.002.
- [14] Radiani, J.; Majchrzak, T.A.; Fromm, J.; Wohlgemant, I. A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education* 2020, 147, 103778. doi:10.1016/j.compedu.2019.103778.
- [15] Gonnermann, N.; Kosch, T. Reducing cognitive load by using visual guidance in augmented reality. In: Proceedings of the IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR) – Workshops; 2024; pp. 1–4. Disponible en línea: <https://thomaskosch.com/wp-content/papercite-data/pdf/gonnermann2024value.pdf> (consultado el 15 julio 2025).
- [16] Buchner, J.; Buntins, K.; Kerres, M. The impact of augmented reality on cognitive load and performance: A systematic review. *Journal of Computer Assisted Learning* 2021, 37(3), 805–823. doi:10.1111/jcal.12617.
- [17] Sweller, J.; Ayres, P.; Kalyuga, S. *Cognitive Load Theory*; Springer: New York, NY, USA, 2011. doi:10.1007/978-1-4419-8126-4.