




Estudio de resistores utilizando realidad aumentada en la web

Study of resistors using web-based augmented reality

Edgar Serrano Pérez ^{1*}, Anabelem Soberanes Martín ¹ y José Luis Castillo Mendoza ¹

¹Centro Universitario UAEM Valle de Chalco, Universidad Autónoma del Estado de México, Valle de Chalco Solidaridad, México

*E-mail: eserranop_s@uaemex.mx

Recibido el 14 de marzo de 2024 | Aceptado el 27 de julio de 2024

Resumen

En este trabajo se presentan dos actividades que integran tecnologías de realidad aumentada en la web para apoyar el proceso de enseñanza y aprendizaje de las resistencias. El objetivo es que los estudiantes exploren el tema de los resistores de manera práctica, construyendo circuitos físicos y apoyándose en la realidad aumentada. Se busca conocer la percepción de los alumnos sobre la facilidad de uso de estas tecnologías, con miras a abordar otros contenidos relevantes en cursos de física a nivel medio superior. Las actividades se implementaron en una escuela pública de Valle de Chalco, México, durante el curso de Física del cuarto semestre. Se formaron equipos mixtos de trabajo para llevar a cabo las actividades y se aplicó un cuestionario adaptado para evaluar la utilidad, facilidad de uso, aprendizaje y satisfacción. Los resultados indican que las aplicaciones de realidad aumentada ayudaron a los alumnos a completar sus tareas y visualizar objetos virtuales en 2D y 3D. Se resalta la importancia de combinar teoría y práctica para una comprensión más clara del conocimiento adquirido en el aula.

Palabras clave: Resistencia eléctrica; Código de colores; Circuito serie; Realidad aumentada; Modelado 3D.

Abstract

This paper presents two activities that integrate augmented reality technologies on the web to support the teaching and learning process of resistors. The aim is for students to explore the topic of resistors practically, building physical circuits and relying on augmented reality. The objective is to determine the students' perception of the ease of use of these technologies and address other relevant content in physics courses at the upper secondary level. The activities were implemented in a public school in Valle de Chalco, Mexico, during the fourth-semester Physics course. Mixed work teams were formed to carry out the activities, and an adapted questionnaire was applied to evaluate the usefulness, ease of use, learning, and satisfaction. The results indicate that the augmented reality applications helped students to complete their assignments and visualize virtual objects in 2D and 3D. It highlights the importance of combining theory and practice to understand better the knowledge acquired in the classroom.

Keywords: Electrical resistance; Code of colors; Serial circuit; Augmented reality; 3D Modelling.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las tecnologías que ha captado considerablemente la atención en el ámbito educativo es la realidad aumentada, la cual permite incorporar elementos virtuales a la visualización en tiempo real de imágenes capturada a través de las cámaras de dispositivos móviles (AlGerafi, Zhou, Oubibi y Wijaya, 2023; Kljun, Geroimenko y Čopič Pucihar, 2020). Con la disminución de los costos de dispositivos móviles como tabletas y teléfonos celulares, estos se vuelven más accesibles para las personas, ganando mayor aceptación entre las comunidades jóvenes que se han familiarizado con su uso desde edades tempranas (Iqbal y Bhatti, 2020). Una gran parte de los estudiantes de nivel medio superior posee habilidades para utilizar diversas funciones del dispositivo, ya sea de su propiedad o prestado por sus familiares.

Generalmente, se restringe el uso de teléfonos celulares en el aula de clases, ya que los estudiantes tienden a distraerse y consultar contenido que no está relacionado con el contexto educativo, tecnologías como la realidad aumentada pueden potenciar los procesos de enseñanza y aprendizaje al proporcionar a los estudiantes recursos educativos que fomenten la atención, enfoque y concentración (Alzahrani, 2020), utilizando el mismo dispositivo que emplean para realizar sus actividades diarias de comunicación audiovisual. Esta situación representa un medio potencial para la personalización del aprendizaje en situaciones de educación a distancia, especialmente durante la crisis sanitaria provocada por la pandemia de COVID-19, donde los estudiantes se vieron obligados a realizar prácticas de laboratorio con recursos limitados (Andrews, de Los Ríos, Rayaluru, Lee, Mai, Schusser y Mak, 2020; Lellis-Santos y Abdulkader, 2020).

En el nivel medio superior, las asignaturas con un fuerte componente matemático, como la física, suelen plantear grandes desafíos para los estudiantes. Esto se debe a que a menudo se presentan conceptos teóricos que intentan explicar fenómenos físicos a través de fórmulas y ecuaciones, sin que los estudiantes logren percibir la utilidad o aplicación práctica de dicho conocimiento en situaciones cotidianas. En la literatura, se ha utilizado la realidad aumentada para abordar temas como la ley de Ohm (Stolzenberger, Frank y Trefzger, 2022) y circuitos completos de resistores y fuente de corriente directa (Lucas, Vaca, Domínguez y Ochoa, 2018; Reyes-Avilés y Avilés-Cruz, 2018; Stolzenberger, Frank y Trefzger, 2022). En este contexto, la realidad aumentada también se ha utilizado como una herramienta educativa para la síntesis de circuitos con hardware en una placa de pruebas o placa de inserción (en inglés, *proto-board*) (Marques, Esteves, Alves, Ferreira, Días y Santos, 2019; Thiwanka, Chamodika, Priyankara, Sumathipala y Weerasuriya, 2018). La mayoría de los trabajos relacionados se han centrado en mejorar las prácticas educativas en el nivel superior, especialmente para las carreras de ingeniería.

En este contexto, el presente trabajo, se enfoca en el módulo de electrodinámica de la asignatura Física de nivel medio superior. En la investigación, se integran dos actividades que utilizan realidad aumentada en la web a través de marcadores, los cuales son imágenes que permiten ubicar objetos virtuales de aplicación en la pantalla. La primera actividad se enfocaba en apoyar el tema del código de colores de las resistencias, y la segunda, sobre el tema de conexión serie y paralelo de resistores en una placa de pruebas. Ambas actividades fueron desarrolladas para nivel medio superior y se realizaron durante una sesión de 2 horas cada una. Esta integración de tecnología innovadora en el proceso educativo busca no solo mejorar la comprensión de conceptos complejos, sino también facilitar la aplicación práctica de estos conocimientos en entornos reales, brindando a los estudiantes una experiencia más interactiva y significativa en el aprendizaje de la física.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

Para el desarrollo de las aplicaciones de realidad aumentada, se crearon marcadores personalizados con el propósito de activar la visualización de objetos virtuales al ser detectados por la cámara del teléfono. Este enfoque ofrece la ventaja de que, al emplear distintos marcadores, los usuarios pueden identificar de manera más intuitiva el contexto de cada aplicación (Wibowo, Saputra, Amalia y Ulfa, 2018). Se optó por utilizar la librería AR.js (Étienne, 2020) para el desarrollo de las aplicaciones de realidad aumentada en la web, dado que permite el acceso y uso de la aplicación a través del navegador de los dispositivos móviles más comunes y a gran escala (Qiao, Ren, Dustdar, Liu, Ma y Chen, 2019). Para facilitar el acceso a cada aplicación se ha incorporado un código QR que redirige a los usuarios al sitio web donde se encuentra alojada la aplicación de realidad aumentada correspondiente a cada actividad, simplificando así la navegación en los teléfonos celulares.

Los objetos en tres dimensiones fueron diseñados y modelados utilizando el software Tinkercad, que permite la creación de diversos elementos virtuales tridimensionales con enfoques educativos variados. En el contexto específico de este proyecto, estos elementos incluyen componentes mecánicos (Karaismailoglu y Yildirim, 2023; Kumawat, Rathore, Negi y Barthwal, 2024), útiles para generar recursos educativos destinados a abordar distintos temas de física y diversas disciplinas dentro del campo de la ingeniería.

Al planificar la actividad en el nivel medio superior de una escuela pública, se tuvo en cuenta que no todos los alumnos cuentan con un teléfono celular propio. Además, se consideró la limitación de material para llevar a cabo las prácticas de circuitos eléctricos físicos, que incluyen una tablilla de prototipos, resistencias físicas y cables de conexión. De este modo, de un total de 40 alumnos de bachillerato tecnológico (de la carrera de tecnologías de la información y la comunicación), se decidió formar 8 equipos mixtos, compuesto por hombres y mujeres, con 5 alumnos cada uno, asegurando que al menos un teléfono celular por equipo tuviera acceso a datos para la navegación en el portal de la aplicación de realidad aumentada. Los alumnos tenían entre 15 y 18 años y, al momento de realizar las actividades, aún no habían abordado el tema de resistencia eléctrica en el curso de física.

En la primera actividad, se creó un marcador a partir de la imagen del símbolo eléctrico de la resistencia. Cuando los alumnos accedían al sitio de la aplicación mediante el código QR y enfocaban el marcador de la cámara de sus

teléfonos, se activaban los objetos superpuestos sobre la imagen capturada. El objetivo principal de esta actividad era presentar a los alumnos una tabla con el código de colores de las resistencias y un ejemplo práctico para su comprensión. Además, en la parte superior de la tabla se mostró una representación en 3D de las resistencias eléctricas, para que los estudiantes se familiarizaran con estos componentes.

Una vez que los alumnos ingresaron al portal de la aplicación de realidad aumentada, se llevaron a cabo dos ejercicios con el objetivo de practicar el uso del código de colores de las resistencias. En primer lugar, se presentaron ejemplos que mostraban los tres colores de las bandas de un resistor, y el ejercicio consistía en determinar el valor de la resistencia. En el siguiente ejercicio práctico, se proporcionó un valor de resistencia y los estudiantes debieron identificar los colores necesarios en bandas según la tabla mostrada en la aplicación de realidad aumentada. Después de completar los ejercicios, se distribuyó a cada equipo un cuestionario adaptado sobre utilidad, facilidad de uso, aprendizaje y satisfacción (Lund, 2001). Los ejercicios se llevaron a cabo sin contratiempos, como se puede observar en la figura 1.



FIGURA 1. Equipo de estudiantes en la aplicación de realidad aumentada del código de colores de las resistencias.

En la segunda actividad, se utilizaron dos marcadores de realidad aumentada que debían ser completados en forma de rompecabezas con cuadros de papel de colores. Cada uno de estos marcadores mostraba un diagrama eléctrico: Uno representa la conexión en serie y en el otro la conexión en paralelo de las resistencias. En esta actividad, los estudiantes debían seleccionar cuadros de papel de colores de 1cm por lado y colocarlos en la posición correcta para completar el marcador. Los diagramas de conexión incluían los valores nominales de las resistencias.

Este proceso permitió completar el marcador de realidad aumentada, habilitando así el inicio de la aplicación, que mostraba una posible conexión física de los elementos en tres dimensiones, utilizando resistencias, una tablilla de prototipos y los cables de conexión. La actividad se llevó a cabo tanto para la conexión en serie como para la conexión en paralelo, creando elementos virtuales tridimensionales que sirven como guía para la conexión física, como se ilustra en la figura 2.

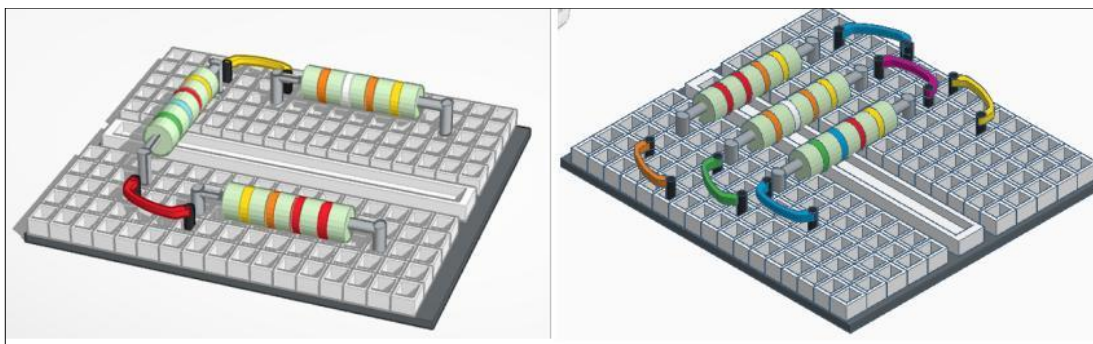


FIGURA 2. Objetos virtuales tridimensionales para apoyar la noción de conexión física de resistencias en circuitos serie y paralelo en una placa de inserción con cables de conexión de cobre.

En la segunda actividad, que abordó la conexión en serie y paralelo de las resistencias, surgieron ciertas complejidades debido a los diversos procesos involucrados. Por un lado, los estudiantes tuvieron que cortar los cuadros de papel de colores y colocarlos sobre la superficie de cada marcador. Se observó que algunos optaron por pegar los cuadros de papel directamente sobre el marcador. Aunque inicialmente no se recomendó esta práctica, ya que al cometer algún error y despegarlos podría distorsionar o dañar la imagen o forma del marcador. No obstante, algunos estudiantes decidieron pegar los cuadros una vez que se sintieron seguros de la posición correcta.

Un aspecto interesante fue que algunos alumnos comenzaron a tomar fotos con un segundo celular de los objetos tridimensionales desplegados en la aplicación de realidad aumentada. Esta estrategia buscó facilitar la implementación física de los circuitos de resistencias a través de una imagen en dos dimensiones, considerándola más eficiente. Este comportamiento puede explicarse por la posibilidad de obtener información relevante para la conexión física desde un ángulo específico del objeto virtual en tres dimensiones, lo que les permitió identificar la disposición de las terminales de las resistencias y los cables sobre la placa de pruebas para establecer conexiones en serie y en paralelo.

Durante este proceso, la participación del docente resultó crucial para describir la estructura interna de la placa de inserción y explicar el uso adecuado de las perforaciones y conductores internos para realizar conexiones eléctricas entre las terminales de los dispositivos. De este modo, a través de la aplicación de realidad aumentada, se presentó una posible configuración de los elementos, considerando las múltiples formas para lograr una misma conexión física mediante la placa de pruebas, como se ilustra en la figura 3.

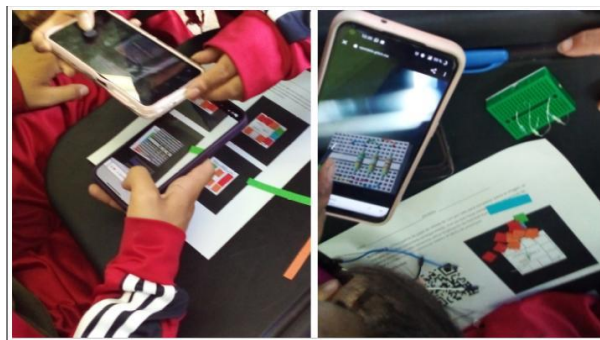


FIGURA 3. Alumnos utilizando el marcador de realidad aumentada para la actividad de circuito serie y paralelo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al finalizar cada actividad, se pidió a los equipos que completaran un cuestionario de opción múltiple compuesto por 15 enunciados, en los cuales los estudiantes expresaban su percepción tras llevar a cabo cada tarea. Utilizando una escala de 7 opciones que iban desde “Muy desacuerdo” (1) hasta “Muy de acuerdo” (7), se recopiló la opinión en general de cada equipo respecto a los siguientes enunciados.

Utilidad

1. Me ayuda a ser más efectivo
2. La aplicación es útil
3. Me facilita completar mis actividades
4. Me ahorra tiempo cuando la uso
5. Hace todo lo que esperaba que hiciera

Facilidad de Uso

1. Es fácil de usar
2. Es simple de usar
3. Puedo usarla sin instrucciones escritas
4. Se utiliza sin esfuerzo
5. Puedo utilizarla satisfactoriamente en cualquier momento

Facilidad de Aprendizaje

1. Aprendí a usarla rápidamente
2. Recuerdo fácilmente como usarla
3. Es fácil aprender a usarla

Satisfacción

1. Estoy satisfecho con la aplicación
2. Es divertido de utilizar

Los resultados de usabilidad de la primera actividad, relacionada con el código de colores de las resistencias, se presenta en el diagrama de caja y bigotes mostrado en la figura 4.

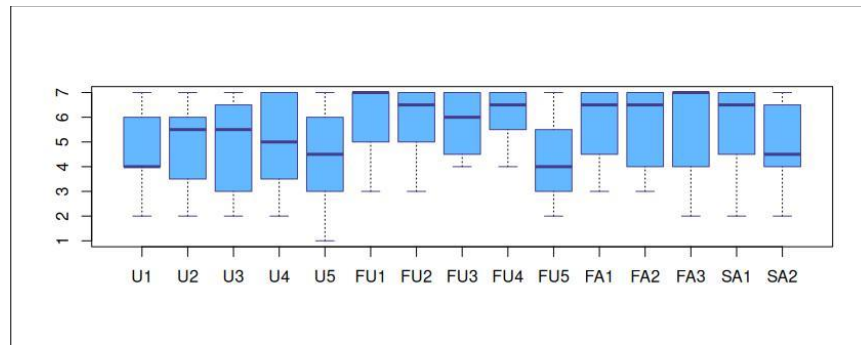


FIGURA 4. Resultados de opinión estudiantil de la actividad del código de colores con la aplicación de realidad aumentada.

En la sección de utilidad, la pregunta 1, relacionada con la efectividad del uso de la aplicación, obtuvo un promedio de 4.62, situándose por encima del valor neutro (4) en la escala de percepciones. Tanto la segunda como la tercera pregunta alcanzaron un promedio de 4.87, indicando que los estudiantes perciben que la aplicación es útil y les facilita sus actividades. La cuarta pregunta, que evalúa el ahorro de tiempo al utilizar la aplicación, obtuvo un promedio de 5.0, reflejando que los alumnos están de acuerdo en que les permite optimizar su tiempo. Por otro lado, la última pregunta de utilidad obtuvo el promedio más bajo, con un 4.37, cercano al punto neutral de la escala de percepciones. Esta pregunta se enfoca en si la aplicación cumple con todas las actividades requeridas; se planea mejorar este aspecto mediante una mayor interactividad para que los estudiantes puedan realizar más operaciones con los objetos virtuales en pantalla.

En cuanto a la sección de Facilidad de Uso, la primera pregunta obtuvo un promedio de 6, situándose cerca del máximo nivel de “muy de acuerdo”. Esto indica que, en general, la aplicación es considerada fácil de utilizar. La segunda pregunta alcanzó un promedio de 5.87, lo que también sugiere que es percibida como simple de usar. La tercera pregunta, que se refiere a la posibilidad de utilizarla sin instrucciones escritas, obtuvo un promedio de 5.75. La cuarta pregunta destacó con un promedio de 6.12, mostrando que los estudiantes consideran que la aplicación se puede utilizar sin esfuerzo. Sin embargo, la quinta pregunta, relacionada con la disponibilidad para usarla en cualquier momento, obtuvo el más bajo promedio en esta sección, con un 4.25, cercano al punto neutral. Este descenso en la percepción puede explicarse por la necesidad de que cada persona tenga un celular, lo que limita el uso en cualquier momento, ya que solo un miembro del equipo puede estar utilizando el dispositivo a la vez.

Respecto a la facilidad de aprendizaje, los promedios oscilaron entre 5.62 y 5.75 en las tres preguntas planteadas, reflejando una percepción positiva sobre lo rápido y fácil que los estudiantes aprendieron a utilizar la aplicación. Finalmente, en la sección de satisfacción, los resultados indican que los alumnos están generalmente satisfechos con la aplicación (promedio de 5.62), aunque perciben menos diversión al utilizarla (promedio de 4.8). Se sugiere aumentar la interactividad para mejorar el entretenimiento y el compromiso del usuario.

En términos generales, todas las percepciones se sitúan mayormente en el rango que va desde neutral hasta “muy de acuerdo”, lo que indica que la aplicación es útil, fácil de usar y aprender, y satisface a los estudiantes. Los resultados detallados después de finalizar la segunda actividad se muestran en la figura 5.

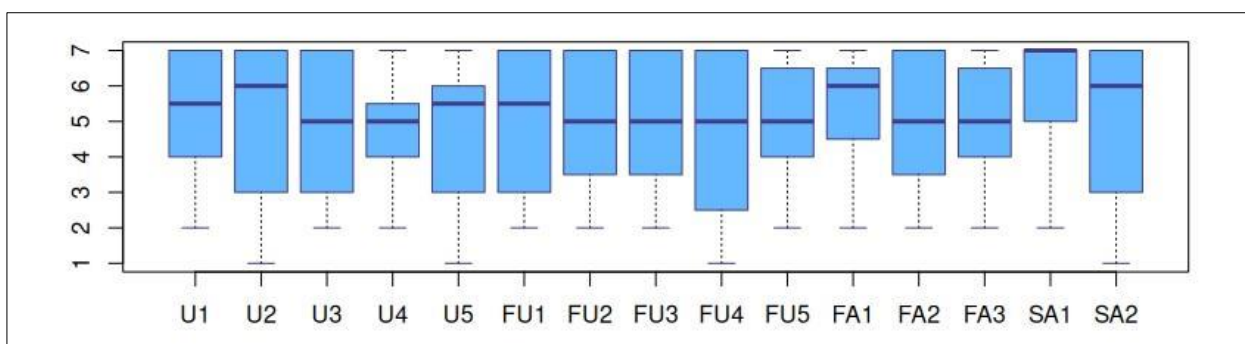


FIGURA 5. Resultados obtenidos de la opinión estudiantil de la actividad de conexión en serie y paralelo con resistores utilizando la aplicación de realidad aumentada.

En la segunda actividad, se requiere construir el marcador con los cuadros de papel de colores indicados. Al activar la visualización de los objetos virtuales en la aplicación de realidad aumentada, se muestra los diagramas físicos de conexión de las resistencias en la placa de inserción. En la sección de utilidad, las preguntas 1 y 2 obtuvieron un

promedio de 5.25 y 5.0, respectivamente, lo que indica que los estudiantes consideran que la aplicación les permite ser más efectivos y es útil para cumplir con sus objetivos. En comparación con la primera actividad, se observó una mejora en la percepción para estas preguntas. La tercera pregunta obtuvo un promedio de 4.87, indicando que la aplicación ayuda a los estudiantes a completar sus actividades; este valor se mantuvo similar al de la primera actividad. Respecto a la cuarta pregunta, se obtuvo un promedio de 4.75, sugiriendo que los estudiantes están de acuerdo en que la aplicación les ahorra tiempo, aunque esta percepción disminuyó en comparación con la actividad anterior, posiblemente debido al tiempo adicional requerido para construir el marcador en esta segunda actividad.

En relación con la quinta pregunta, se obtuvo un promedio de 4.625 en comparación con el promedio de 4.37 en la actividad anterior. Se observa una ligera mejora en la percepción sobre las operaciones que los usuarios desean realizar en la aplicación, posiblemente debido a la presentación de objetos tridimensionales más detallados que les permiten crear circuitos de conexión física con las resistencias, facilitando así el desarrollo de las actividades.

En cuanto a la sección de facilidad de uso, se identifica una disminución general en la percepción de los estudiantes, ya que las preguntas 1, 2 y 3 obtuvieron un promedio de 5, lo que indican que, aunque la aplicación es fácil y simple de usar, y puede utilizarse sin instrucciones escritas, esta percepción fue menor en comparación con la primera actividad. Es importante recordar que la actividad 2 implica construir el marcador y crear el circuito de conexión físico con las resistencias y la placa de pruebas. La pregunta 4 sobre el esfuerzo requerido para utilizar la aplicación obtuvo un promedio de 4.62 en contraste con la misma pregunta de la actividad 1, donde se alcanzó de 6.12. Esta diferencia refleja el mayor esfuerzo que se requiere para completar una actividad más elaborada y compleja en esta segunda etapa.

La pregunta 5 de la sección de facilidad de uso obtuvo un promedio de 5.0, mostrando una mejoría respecto con la actividad 1. Esta mejora podría atribuirse a observaciones durante la ejecución de la actividad; por ejemplo, algunos estudiantes optaron por tomar fotografías a los objetos virtuales en lugar de visualizarlos continuamente en la aplicación, lo cual resultó más eficiente para ellos. Otros alumnos pegaron los cuadros de papel de colores a las imágenes del marcador para mantener fija la estructura, facilitando así la consulta y visualización de la información con el celular.

En cuanto a la sección de facilidad de aprendizaje, las preguntas obtuvieron promedios entre 5.0 y 5.37, indicando que los estudiantes consideran que aprenden rápidamente a utilizar la aplicación y recuerdan cómo hacerlo. Aunque se observa un ligero descenso respecto a la actividad anterior, esto puede atribuirse nuevamente a la mayor complejidad y requerimientos adicionales de esta segunda actividad. En la sección de satisfacción, se registraron promedios de 5.87 y 5.0 para las preguntas relacionadas con la satisfacción general y diversión al utilizarla respectivamente. Se observa una leve mejora en comparación con la actividad previa en términos de la percepción de satisfacción del usuario. Para facilitar la visualización de los resultados obtenidos, se presentan los promedios obtenidos de ambas actividades en forma tabular, tal como se muestra en la tabla I.

TABLA I. Promedios obtenidos para las actividades 1 y 2.

Enunciado del cuestionario	Promedio Actividad 1	Promedio Actividad 2
U1. Me ayuda a ser más efectivo	4.62	5.25
U2. La aplicación es útil	4.87	5.00
U3. Me facilita completar mis actividades	4.87	4.87
U4. Me ahorra tiempo cuando la uso	5.00	4.75
U5. Hace todo lo que esperarí que hiciera	4.37	4.62
FU1. Es fácil de usar	6.00	5.00
FU2. Es simple de usar	5.87	5.00
FU3. Puedo usarla sin instrucciones escritas	5.75	5.00
FU4. Se utiliza sin esfuerzo	6.12	4.62
FU5. Puedo utilizarla satisfactoriamente en cualquier momento	4.25	5.00
FA1. Aprendí a usarla rápidamente	5.75	5.37
FA2. Recuerdo fácilmente como usarla	5.62	5.00
FA3. Es fácil aprender a usarla	5.62	5.00
SA1. Estoy satisfecho con la aplicación	5.62	5.87
SA2. Es divertido de utilizar	4.87	5.00

Finalmente, los resultados demuestran una evolución positiva en varios aspectos entre ambas actividades; sin embargo, también se identifican áreas donde se puede seguir mejorando para optimizar tanto el uso como el aprendizaje con esta aplicación de realidad aumentada.

IV. CONCLUSIONES

Se realizaron dos actividades con el objetivo de facilitar el aprendizaje sobre los temas de código de colores de las resistencias y conexión físicas en serie y paralelo, utilizando tecnologías de realidad aumentada y elementos de hardware. Para evaluar la percepción de los estudiantes al utilizar ambas aplicaciones, se aplicó un cuestionario adaptado para medir la usabilidad (Lund, 2001). En términos generales, al comparar las dos actividades con tecnologías de realidad aumentada, se observó una mejor percepción de utilidad y satisfacción en la actividad 2. En esta actividad, se requirió la participación del usuario para crear el marcador de realidad aumentada, y utilizar modelos en 3D como guía para las conexiones físicas de los circuitos eléctricos con resistencias.

Por otro lado, se observó una mayor facilidad de uso y aprendizaje en la actividad 1, donde solo se necesita observar y consultar la información sobre el código de colores de las resistencias. Ambas actividades se llevaron a cabo en equipos debido a limitaciones en dispositivos móviles disponibles y cantidad limitada de hardware para implementar los circuitos resistivos en la placa de inserción. Aunque el proceso fue satisfactorio, se recomienda contar con un celular y material completo para cada estudiante en la medida de lo posible.

En concordancia con trabajos relacionados (Lucas, Vaca, Domínguez y Ochoa, 2018), los estudiantes recibieron positivamente las actividades ya que se añade un toque tecnológico novedoso al modelo de enseñanza tradicional. Los estudiantes participaron activamente, al incorporar tecnologías educativas que refuerzan los conceptos teóricos a través de experiencias prácticas, utilizando la realidad aumentada como medio visual innovador para presentar la información. Esto permite una mejor visualización en 2D y 3D para examinar detalles como colores, formas, geometría y tamaño de los elementos, que inicialmente se conocen teóricamente con diagramas y símbolos. Todo esto se logra a través del uso cotidiano del teléfono celular como pantalla para visualizar objetos virtuales que representan una aproximación a objetos del mundo real, facilitando así la adaptación y aprendizaje en aspectos técnicos como el desarrollo de circuitos y conexiones eléctricas con resistencias en una placa de pruebas. Finalmente, la inclusión de tecnologías educativas innovadoras como la realidad aumentada puede potenciar significativamente la enseñanza y el aprendizaje en entornos técnicos, brindando a los estudiantes una experiencia educativa más enriquecedora y estimulante, al ser inmersiva y tangible.

AGRADECIMIENTOS

Se reconoce el apoyo de CONAHCYT a través del programa de renovación de “Estancia Posdoctoral por México”.

REFERENCIAS

- AlGerafi, M. A., Zhou, Y., Oubibi, M., y Wijaya, T. T. (2023). Unlocking the potential: A comprehensive evaluation of augmented and virtual reality in education. *Electronics*, 12(18), 3953. <https://doi.org/10.3390/electronics12183953>
- 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>
- Andrews, J. L., de Los Rios, J. P., Rayaluru, M., Lee, S., Mai, L., Schusser, A., y Mak, C. H. (2020). Experimenting with at-home general chemistry laboratories during the COVID-19 pandemic. *Journal of chemical education*, 97(7), 1887-1894. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00483>
- Etienne, J. (2020). AR.js. AR. Js-Docs. URL: <https://github.com/jeromeetienne/AR.js>
- Iqbal, S., y Bhatti, Z. A. (2020). A qualitative exploration of teachers' perspective on smartphones usage in higher education in developing countries. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 17(1), 29. <https://doi.org/10.1186/s41239-020-00203-4>
- Karaismailoglu, F., y Yildirim, M. (2023). The effect of 3D modeling performed using Tinkercad or concrete materials in the context of the flipped classroom on pre-service teachers' spatial abilities. *Research in Science & Technological Education*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/02635143.2023.2223134>
- Kljun, M., Geroimenko, V., y Čopič Pucihar, K. (2020). Augmented reality in education: Current status and advancement of the field. *Augmented Reality in Education: A New Technology for Teaching and Learning*, 3-21. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42156-4_1

- Kumawat, S., Rathore, K. S., Negi, S., y Barthwal, S. (2024, January). Investigation and analysis of ultrasonic sensor for automatic control of garage door. In *AIP Conference Proceedings* 2978(1). <https://doi.org/10.1063/5.0185622>
- Lellis-Santos, C., y Abdulkader, F. (2020). Smartphone-assisted experimentation as a didactic strategy to maintain practical lessons in remote education: alternatives for physiology education during the COVID-19 pandemic. *Advances in physiology education*, 44(4), 579-586. <https://doi.org/10.1152/advan.00066.2020>
- Lucas, P., Vaca, D., Dominguez, F., y Ochoa, X. (2018, July). Virtual circuits: An augmented reality circuit simulator for engineering students. In *2018 IEEE 18th international conference on advanced learning technologies (ICALT)* (pp. 380-384). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICALT.2018.00097>
- Lund, A. M. (2001). Measuring usability with the use questionnaire¹². *Usability interface*, 8(2), 3-6.
- Marques, B., Esteves, R., Alves, J., Ferreira, C., Dias, P., y Santos, B. S. (2019). Investigating Different Augmented Reality Approaches in Circuit Assembly: a User Study. In *Eurographics (Short Papers)* (pp. 45-48).
- Qiao, X., Ren, P., Dustdar, S., Liu, L., Ma, H., y Chen, J. (2019). Web AR: A promising future for mobile augmented reality—State of the art, challenges, and insights. *Proceedings of the IEEE*, 107(4), 651-666. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2895105>
- Reyes-Aviles, F., y Aviles-Cruz, C. (2018). Handheld augmented reality system for resistive electric circuits understanding for undergraduate students. *Computer Applications in Engineering Education*, 26(3), 602-616. <https://doi.org/10.1002/cae.21912>
- Stolzenberger, C., Frank, F., y Trefzger, T. (2022). Experiments for students with built-in theory: 'PUMA: Spannungslabor'—an augmented reality app for studying electricity. *Physics Education*, 57(4), 045024. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac60ae>
- Thiwanka, N., Chamodika, U., Priyankara, L., Sumathipala, S., y Weerasuriya, G. T. (2018, December). Augmented Reality Based Breadboard Circuit Building Guide Application. In *2018 3rd International Conference on Information Technology Research (ICITR)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICITR.2018.8736156>
- Wibowo, D. W., Saputra, P. Y., Amalia, E. L., y Ulfa, F. (2018). Penerapan Library AR. JS untuk Pembuatan Augmented Reality Sebagai Media Pembelajaran Pengenalan Hewan. *SMARTICS Journal*, 4(2), 52-55. <https://doi.org/10.21067/smartics.v4i2.3185>