

El problema del potencial eléctrico para una caja cuadrada finita



ISSN 1870-9095

Andrés González García¹, Beatriz Rubio Campos², Gerardo González García³, Juan J Rosales García⁴

¹Universidad de Guanajuato, Escuela de Nivel Medio Superior Centro Histórico León, Av. Álvaro Obregón No. 308, Col. Centro, C.P. 37000, León, Gto. México.

²Universidad de Guanajuato, Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato. Alameda No. 100; Colonia Centro; C.P. 36000; Guanajuato, Gto., México.

³Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas Noria Alta s/n; C.P. 36050; Guanajuato, Gto., México.

⁴Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km. 3.5 + 1.8; Comunidad de Palo Blanco; Salamanca, Gto. México.

E-mail: andres.gonzalez@ugto.mx

(Recibido el 4 junio de 2025, aceptado el 3 de octubre de 2025)

Resumen

En este estudio experimental y numérico se muestra una de las aplicaciones de la ecuación de Laplace, cuando se conocen las condiciones de límite del potencial eléctrico. Esta labor tiene como objetivo fomentar el razonamiento crítico de los alumnos, a través de la implementación del aprendizaje STEAM (abreviatura de Ciencia, Tecnología, Artes y Matemáticas) y la ludoplastia, técnicas en constante evolución en los programas de ciencias exactas. Se pueden desarrollar soluciones para el problema de la caja infinita, tanto para una mejor comprensión de los campos electromagnéticos impartidos en el nivel medio superior (NMS) como en el nivel superior (NS).

Palabras clave: Ecuación de Laplace, método interactivo, diferencias finitas.

Abstract

In this experimental and numerical study, one of the applications of Laplace's equation is shown when the boundary conditions of the electric potential are known. This work aims to foster students' critical thinking through the implementation of STEAM learning (Science, Technology, Arts, and Mathematics) and ludoplasty, techniques that are constantly evolving in exact sciences programs. Solutions can be developed for the infinite box problem, both for a better understanding of electromagnetic fields taught at the upper secondary level (NMS) and at the higher education level (NS).

Keywords: Laplace's equation, interactive method, finite differences.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio del campo electromagnético y su relación con el potencial eléctrico es fundamental en los cursos de Nivel Medio Superior y Nivel Superior, ya que permite comprender cómo las cargas interactúan entre sí y generan campos electromagnéticos. Este análisis es clásico: primero se calcula el campo eléctrico mediante sumas o integrales sobre configuraciones de carga, como distribuciones puntuales o lineales. Posteriormente, mediante la ley de Gauss, se determina la densidad de desplazamiento eléctrico \mathbf{D} y el campo eléctrico \mathbf{E} . Aunque estos enfoques son útiles para obtener información desde distintas perspectivas, resultan limitantes en la práctica debido a la dificultad de conocer con precisión las distribuciones de carga en la mayoría de los casos [1, 2]. Siguiendo el concepto de gradiente aplicado a los campos electromagnéticos, se demuestra que el gradiente negativo del potencial eléctrico corresponde al campo eléctrico. Continuando en este sentido,

este planteamiento supone tácitamente conocer la función de potencial eléctrico en toda el área analizada, lo cual no siempre es posible en la práctica. Por otro lado, se dispone de información sobre materiales conductores que pueden adoptar formas diversas, como planos, superficies curvas o líneas, lo que permite establecer condiciones de frontera a partir de su geometría y propiedades físicas [3, 4, 5]. Es en este punto donde la ecuación de Laplace se convierte en una herramienta fundamental para determinar el potencial eléctrico, partiendo de condiciones de frontera conocidas [6, 7]. Para complementar el aprendizaje de este tema, se promueven sinergias metodológicas entre el enfoque STEAM y la ludoplastia. Este tipo de metodologías estimula el pensamiento interdisciplinario y favorece la dinamización del proceso educativo, permitiendo que los estudiantes aborden la problematización desde múltiples perspectivas. De este modo, se implican activamente en la construcción de soluciones y en el diseño de sus propias estrategias de resolución [8, 9, 10]. Por ejemplo, a través del problema del

potencial eléctrico en una caja cuadrada finita propuesto en este trabajo, se realiza el modelado físico del sistema y se generan representaciones gráficas del potencial eléctrico, lo que permite visualizar y analizar su distribución en condiciones específicas [11, 12, 13, 14, 15].

II. ARGUMENTO MATEMÁTICO

A partir de las ecuaciones de Maxwell, donde: $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$, sustituyendo en $\epsilon \mathbf{E} = \mathbf{D}$ y $-\nabla \cdot V = \mathbf{E}$.

$$\nabla \cdot \epsilon (-\nabla V) = \rho, \quad (1)$$

Si en toda la región bajo estudio el medio es homogéneo, entonces ϵ puede retirarse de las derivadas parciales involucradas en la divergencia, obteniéndose la ecuación de Poisson.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon}. \quad (2)$$

Cuando la región bajo estudio contiene cargas en una distribución de densidad de cargas conocida ρ , la ecuación de Poisson puede usarse para determinar el potencial eléctrico V . Pero si la región de interés está libre de cargas eléctricas con una permitividad uniforme, la ecuación de Poisson se convierte en la ecuación de Laplace.

$$\nabla \cdot \nabla V = \nabla^2 V = 0. \quad (3)$$

La ecuación de Laplace representa la divergencia del gradiente de V ; estas dos operaciones pueden usarse para obtener la forma de la ecuación en un sistema coordenado particular. Para coordenadas cartesianas, el gradiente para el potencial eléctrico está expresado como:

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{k}. \quad (4)$$

Para un campo vectorial general \mathbf{A} , la divergencia se expresa como:

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}, \quad (5)$$

por consiguiente, la ecuación de Laplace es

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0, \quad (6)$$

Una de las soluciones para la ecuación 6 es mediante el método del producto cartesiano. Cuando el potencial eléctrico varía en más de una dirección, la ecuación 6 contiene más de un término. Suponiendo que V es una función para x como para y , esta tendrá la forma: $V = X(x)Y(y)$. Por separación de variables, la ecuación 6 se transforma en

$$V = [C_1 \cosh(ax) + C_2 \sinh(ax)][C_3 \cos(ay) + C_4 \sin(ay)]. \quad (7)$$

Como la ecuación de Laplace es lineal y homogénea, una suma de productos de la forma de la ecuación 7, donde cada producto corresponde a un valor diferente de a , es también una solución. Esta será la solución más general que se puede desarrollar.

III. EL PROBLEMA DEL POTENCIAL ELÉCTRICO PARA UNA REGIÓN CUADRADA FINITA

En esta sección se considera el problema de encontrar la función de potencial eléctrico para la región interna para una caja cuadrada finita, como la que se muestra en la Figura 1.

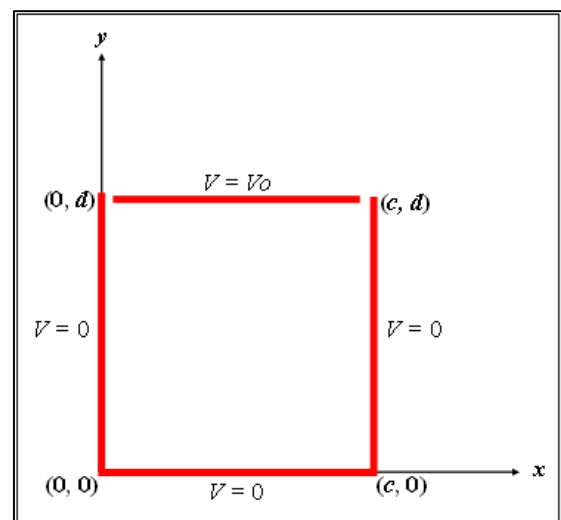


FIGURA 1. Estudio del potencial eléctrico en una caja cuadrada finita.

En el problema bajo estudio, el espacio está libre de carga ($\rho = 0$), y se busca una solución a la ecuación de Laplace ($\nabla^2 V = 0$) que satisfaga las condiciones de frontera. Debido a la importante función que desempeñan las condiciones de frontera, el problema muchas veces se conoce como problema de valor en la frontera. La solución a un problema de valor en la frontera suele facilitarse si se establece en un sistema de coordenadas en el que los límites puedan especificarse de manera sencilla. La frontera, en muchos casos, no puede expresarse simplemente en ningún sistema de coordenadas, y a menudo en tales casos se debe recurrir a otros métodos, como el método de diferencias finitas. Este método resulta ser muy atractivo cuando se asocia con la educación STEAM-Ludoplastia; el aprendizaje por parte de los estudiantes resulta muy creativo y colaborativo. El método de diferencias finitas es una técnica numérica de resolución de ecuaciones como la ecuación de Laplace, el cual se aplicó para dar solución al problema propuesto en este trabajo consistente en encontrar la función del potencial eléctrico para una caja cuadrada finita. El método de

diferencias finitas consistió en dividir la región en secciones M_x , cada una de longitud $\Delta x = (x_f - x_0)/M_x$ a lo largo del eje x , y en secciones M_y , cada una de longitud $\Delta y = (y_f - y_0)/M_y$ a lo largo del eje y , respectivamente, y luego se reemplaza por las segundas derivadas mediante la aproximación de diferencia central de tres puntos.

$$\left. \frac{\partial^2 V(x,y)}{\partial x^2} \right|_{x_i, y_j} \cong \frac{V_{i,j+1} - 2V_{i,j} + V_{i,j-1}}{\Delta x^2} \text{ con } x_j = x_0 + j\Delta x, y_i = y_0 + i\Delta y, \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial^2 V(x,y)}{\partial y^2} \right|_{x_i, y_j} \cong \frac{V_{i+1,j} - 2V_{i,j} + V_{i-1,j}}{\Delta y^2} \text{ con } V_{i,j} = V(x_j, y_i), \quad (9)$$

de modo que, para cada punto interior (x_j, y_i) con $1 \leq j \leq M_x - 1$ y $1 \leq i \leq M_y - 1$, obtenemos la ecuación de diferencias finitas.

$$\frac{V_{i,j+1} - 2V_{i,j} + V_{i,j-1}}{\Delta x^2} + \frac{V_{i+1,j} - 2V_{i,j} + V_{i-1,j}}{\Delta y^2} = 0, \quad (10)$$

donde

$$V_{i,j} = V(x_i, y_j). \quad (11)$$

En este punto es lógico que se pregunte lo siguiente: ¿Cómo se inicializa este algoritmo? Si no se tiene conocimiento previo sobre la solución del problema, es razonable tomar el valor promedio de los valores de frontera como los valores iniciales de $V_{i,j}$. Para ello se desarrolló un algoritmo en MATLAB para utilizar la rutina “laplace.m” y dar solución a la ecuación 10.

El objetivo final es la incorporación de la solución mediante un enfoque STEAM-Ludoplastia, el cual se describe como sigue: **STEAM como puente interdisciplinario.** La educación STEAM nos permite tratar el problema desde todos los lados: **Ciencia:** Analizando el fenómeno físico del potencial eléctrico y su vinculación con las leyes fundamentales de la electrostática. **Tecnología:** Utilizando software o modelos numéricos para implementar el método de diferencias finitas, desarrollando habilidades digitales. **Ingeniería:** Creando réplicas del problema propuesto mediante un arreglo de malla con resistencias eléctricas de geometría cuadrada, aplicando conceptos fundamentales y resolviendo problemas complejos a través de herramientas propias de la ingeniería. **Arte:** Los estudiantes pueden representar las curvas del potencial eléctrico con colores y curvas en los que estén incorporadas las magnitudes y distribuciones del potencial eléctrico. **Matemáticas:** Se utilizan aquellos conceptos como la iteración y propiedades de convergencia para obtener soluciones precisas mediante el método de diferencias finitas. **Ludoplastia:** Como herramienta para el aprendizaje activo, aporta un carácter lúdico al proceso educativo, promoviendo una interacción más exigente y significativa. Por ejemplo, los estudiantes construyen una malla de resistencias con geometría cuadrada; utilizando un cauti

El problema del potencial eléctrico para una caja cuadrada finita 15 W y soldadura de estaño, ensamblan cada componente, finalizando con la conexión de una batería de 8.54 V mediante un conector tipo PP3. El multímetro digital se utiliza para registrar el potencial en cada punto de unión entre cuatro resistencias en la malla. Como una actividad lúdica, los estudiantes asumen el rol de puntos de potencial dentro de una malla simulada, permitiendo calcular iterativamente los valores de dichos potenciales eléctricos mediante la aplicación de condiciones de frontera. El entrenamiento colectivo, mediante dinámicas de trabajo en grupo, tiene como objetivo encontrar soluciones y fomentar la colaboración entre los estudiantes. La inclusión de elementos lúdicos facilita la comprensión del método de diferencias finitas, promueve la participación y convierte el aprendizaje en una experiencia enriquecedora y divertida. Esta metodología permite vincular la aplicación del método con situaciones de la vida cotidiana. El proceso general para resolver un problema mediante diferencias finitas sigue siendo el mismo: definir la malla, establecer las condiciones de frontera, aplicar la ecuación de diferencias finitas e iterar hasta obtener resultados estables. En el contexto actual de la educación STEAM-Ludoplastia, el aprendizaje se orienta hacia la comprensión de beneficios prácticos e inventivos. Por ejemplo, los estudiantes pueden relacionar las curvas del potencial eléctrico con fenómenos del mundo real, como el diseño de circuitos eléctricos o la modelación de campos térmicos. El enfoque interdisciplinario promueve una integración más profunda de conceptos científicos, permitiendo mejorar el pensamiento crítico y la creatividad. Gracias al desarrollo del pensamiento crítico y la creatividad, los estudiantes logran resolver el problema del potencial eléctrico en una región definida por una caja cuadrada finita, utilizando la analogía entre la ecuación de Laplace y la ley de corriente de Kirchhoff. Por lo tanto, se determina el potencial eléctrico V en un punto P dentro de la caja cuadrada finita, conectando inicialmente cuatro resistencias de $R = 10 \text{ k}\Omega$, como se muestra en la Figura 2.

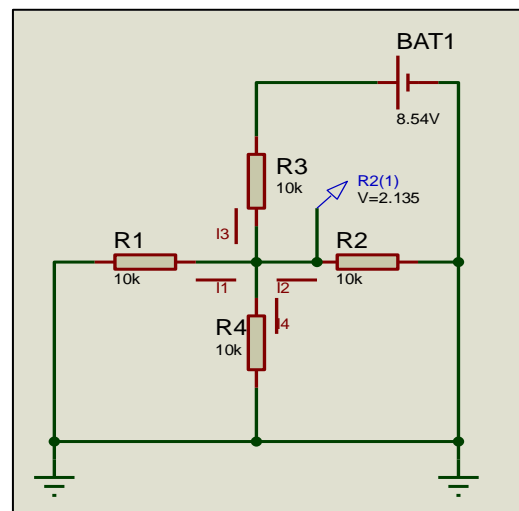


FIGURA 2. Aplicación del análisis de circuitos para la determinación del potencial en el centro de un canal cuadrado finito.

Este arreglo permite simular las condiciones de frontera y aplicar el método de diferencias finitas para obtener una aproximación iterativa del potencial en cada nodo de la malla. Los estudiantes deducen que, según la ley de corrientes de Kirchhoff, en un punto, la suma algebraica de las corrientes en ese punto de unión es cero.

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0, \quad (12)$$

de la ley de Ohm

$$\frac{V_1 - V}{R} + \frac{V_2 - V}{R} + \frac{V_3 - V}{R} + \frac{V_4 - V}{R} = 0, \quad (13)$$

simplificando

$$V = \frac{1}{4}(V_1 + V_2 + V_3 + V_4). \quad (14)$$

El resultado obtenido al aplicar la ecuación de Laplace demuestra que la ley de corrientes de Kirchhoff en un nodo y dicha ecuación son equivalentes bajo condiciones estacionarias. Esto se evidencia al expresar la conservación de la corriente como:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (15)$$

dado que $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ y $\mathbf{E} = -\nabla V$, se obtiene:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \sigma \nabla \cdot \mathbf{E} = \sigma \nabla^2 V = 0. \quad (16)$$

Lo anterior conduce directamente a la ecuación de Laplace. Cuando se construye una malla con múltiples resistores y nodos de conexión, es posible determinar con mayor precisión la distribución del potencial eléctrico, como se ilustra en la Figura 3(a). El arreglo experimental para este propósito, utilizando un voltímetro digital, se muestra en la Figura 3(b). En este montaje, los estudiantes presentan una solución experimental basada en mediciones realizadas sobre cuarenta y nueve puntos distribuidos en una malla de resistencias de 10 kΩ, con especificaciones de ½ vatio y ±5 % de tolerancia. La alimentación se realiza mediante una batería de 8.54 V, y las mediciones se efectúan con un multímetro digital modelo MUL-605 operando en modo voltímetro.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se abordaron tres procedimientos para resolver la ecuación de Laplace en el contexto del problema del potencial eléctrico en una caja cuadrada finita: el método analítico, el computacional y el experimental. Cada enfoque presenta ventajas y limitaciones propias. Al enfrentar un problema específico, es fundamental evaluar las características de cada técnica y seleccionar la más adecuada según los requisitos del caso. Los resultados que se presentan a continuación

constituyen una comparación entre los métodos computacional y experimental. A partir del análisis numérico y de las mediciones experimentales [ver Figuras 3(a)-(b)], y tras el cálculo de los errores absolutos y relativos, se obtiene una perspectiva clara del comportamiento de ambos conjuntos de datos en el contexto de la solución del potencial eléctrico dentro de un dominio cuadrado finito.

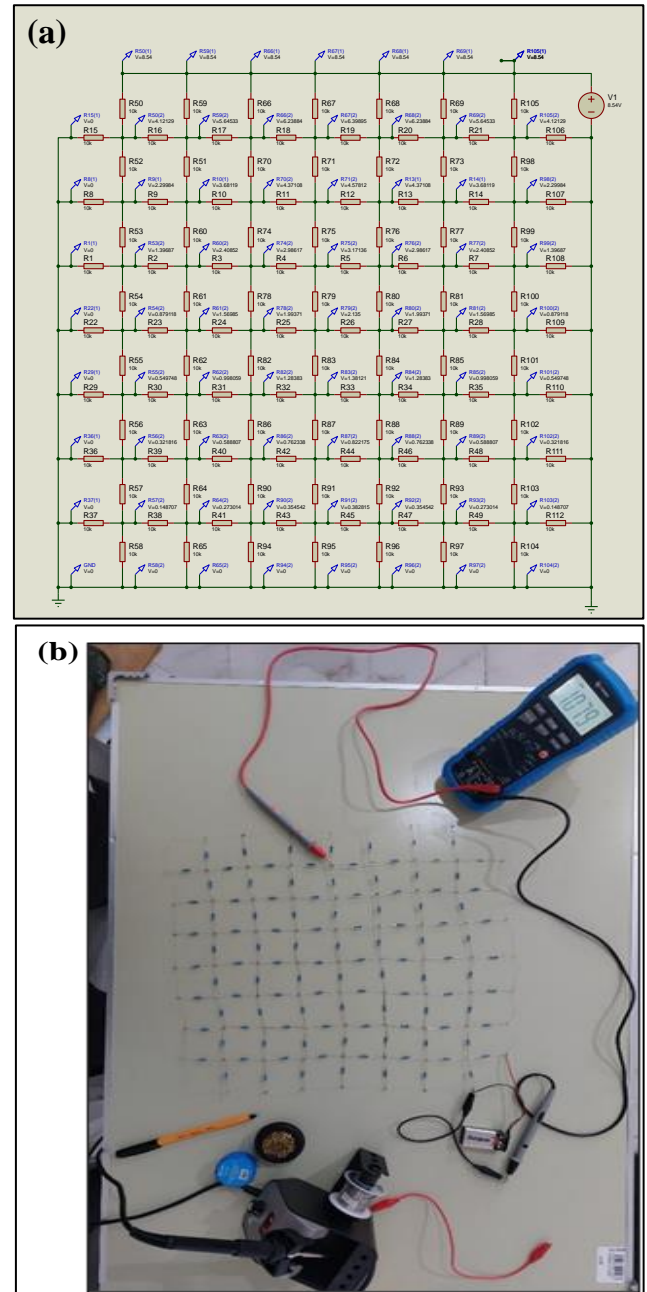


FIGURA 3. Aplicación del análisis de circuitos a la determinación del potencial eléctrico para el problema de la caja cuadrada finita: (a) Medición numérica del potencial en nueve puntos dentro de la región. (b) Medición experimental utilizando una malla de resistencias con geometría cuadrada, donde el potencial se registra mediante un voltímetro digital.

El problema del potencial eléctrico para una caja cuadrada finita
TABLA I. Cálculo detallado de los resultados para cada par de valores.

Datos Numéricos	Datos Experimentales	Error Absoluto	Error Relativo (%)
7.8750	7.591	0.284	3.74%
6.7500	6.642	0.108	1.63%
5.6250	5.693	0.068	1.19%
4.5000	4.744	0.244	5.14%
3.3750	3.796	0.421	11.09%
2.2500	2.847	0.597	20.96%
1.1250	1.898	0.773	40.72%

Las medias (numérica: 4.214, experimental: 4.753, error absoluto: 0.356) y medianas (numérica: 4.5, experimental: 4.744, error absoluto: 0.284) de ambos conjuntos de datos presentan valores cercanos, lo que indica una aproximación numérica razonable al comportamiento observado en la experimentación. Lo anterior sugiere que el modelo numérico reproduce adecuadamente la tendencia global de las mediciones. Además, los datos numéricos exhiben un rango más restringido en comparación con los experimentales, lo que refleja una menor dispersión y mayor estabilidad en el cálculo teórico. Al analizar los resultados presentados en la Tabla I, se observa que los errores absolutos son menores en los valores más altos del potencial eléctrico. Esto indica que las desviaciones entre los datos numéricos y experimentales tienden a ser más pequeñas en las regiones de mayor magnitud, mientras que aumentan progresivamente conforme disminuye el valor del potencial. Los errores relativos tendrían un incremento importante para los valores más pequeños, llegando al 40.72%. La variación se debe a que la precisión del modelo numérico decrece para el caso de los valores experimentales menores. Como análisis final, se les solicitó a los estudiantes que realizaran el cálculo de errores, en este caso para el error absoluto, el cual lo aplicaron restando el valor experimental al valor numérico y tomando el valor absoluto. El error relativo (en porcentaje) lo calcularon con el error absoluto dividido entre el valor experimental y multiplicado por 100 para obtener el porcentaje. La Figura 4 presenta en detalle la comparación entre los datos numéricos y experimentales obtenidos en el estudio. En la Figura 4(a), se muestra una gráfica lineal que superpone ambos conjuntos de datos, permitiendo visualizar su concordancia. La Figura 4(b) representa el error absoluto mediante barras, destacando las diferencias puntuales entre los valores teóricos y experimentales. Finalmente, la Figura 4(c) muestra el error relativo en porcentaje, también mediante una gráfica de barras, lo que facilita la identificación de zonas con mayor sensibilidad o dispersión.

Las figuras de los errores absolutos y relativos concierne patrones relevantes: Las diferencias visuales son más aparentes en las zonas de bajas magnitudes del potencial. Las líneas de contorno numéricas y experimentales probablemente tengan coincidencias en zonas de alta magnitud, pero podrían divergir en las zonas de baja magnitud. Este análisis proporciona datos útiles que permiten ajustar el modelo numérico, ya sea refinando las

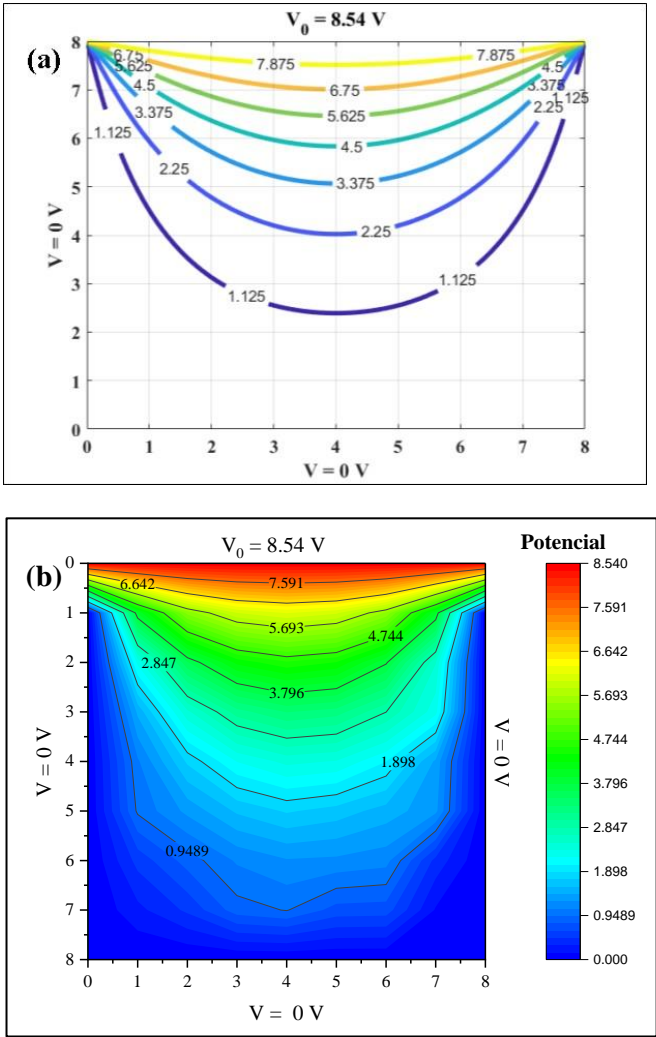


FIGURA 4. Resultados del problema bajo estudio: (a) Resultados obtenidos mediante el método numérico de diferencias finitas. (b) Resultados obtenidos mediante el procedimiento experimental.

Los valores experimentales para el potencial eléctrico abarcan desde 0.9489 V hasta 7.591 V, mientras que los numéricos van de 1.1250 V a 7.8750 V. Esto podría deberse a factores como: Limitaciones en el modelo numérico utilizado. Variabilidad en el entorno experimental que no fue considerada en el modelo e influencia de condiciones de contorno o errores de medición. Los errores más pequeños se encuentran en valores más altos (como el primer y segundo par de datos), mientras que los errores más grandes están en los valores más bajos. Pudo indicar menor precisión del modelo en aquellas zonas en las que los valores disminuyen. Los errores porcentuales son muy altos hacia los valores más bajos, hasta alcanzar el 40.72%. Esto podría ser un signo de que el modelo deja de ser efectivo en ciertos lugares de la resolución del potencial eléctrico. La Tabla I presenta los valores obtenidos mediante los métodos numérico y experimental para el problema del potencial eléctrico en una caja cuadrada finita.

condiciones de contorno o incrementando la resolución computacional, con el objetivo de reducir los errores en las zonas más sensibles del dominio.

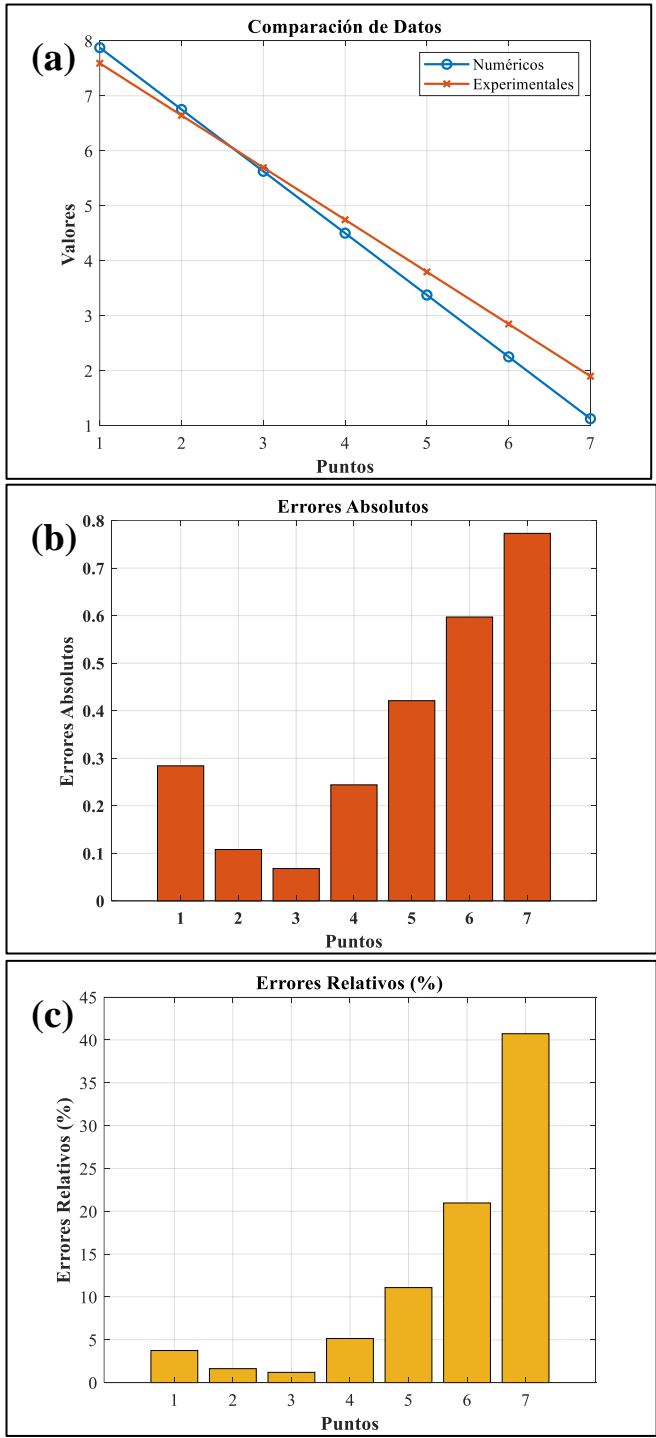


FIGURA 4. Comparación de los datos obtenidos: (a) Conjunto de datos numéricos y experimentales para el potencial eléctrico. (b) Cálculo del error absoluto entre ambos métodos. (c) Determinación del error relativo expresado en porcentaje.

Es recomendable considerar la estimación de parámetros adicionales dentro del modelo numérico, con el propósito de reflejar con mayor fidelidad las condiciones observadas en el entorno experimental. Esta incorporación puede contribuir a mejorar la concordancia entre simulación y medición, especialmente en regiones donde se detecta mayor sensibilidad o dispersión en los datos. Desde el punto de vista experimental, resulta pertinente investigar la variabilidad introducida por factores como el ruido eléctrico, la temperatura ambiente o configuraciones específicas del montaje que puedan influir en la recopilación de datos.

El análisis estadístico, particularmente el trazado de la desviación estándar (numérico: 2.291, experimental: 1.899 y error absoluto: 0.248) y el rango (numérico: 6.7500, experimental: 5.693, error absoluto: 0.705), ha permitido destacar diferencias estructurales entre los conjuntos numéricos y experimentales, evidenciando zonas de mayor sensibilidad y dispersión en el modelo experimental. El análisis estadístico no solo ha permitido cuantificar los errores, sino también identificar con mayor precisión las áreas específicas en las que la solución numérica puede ser optimizada. Esta capacidad de localización de zonas sensibles resulta fundamental para orientar ajustes en el modelo y mejorar la concordancia con los datos experimentales. A partir del mismo análisis, es posible dar continuidad a nuevas simulaciones utilizando ajustes en el modelo numérico, las cuales podrían reiterarse en estudios comparativos para mejorar aún más la precisión de los resultados. Por otro lado, en el enfoque experimental, resulta necesario investigar la influencia de factores externos que puedan estar afectando las mediciones, tales como interferencias ambientales, variaciones en la calidad de los componentes o condiciones no controladas durante la adquisición de datos.

La rutina diseñada en MATLAB destinada a la visualización pormenorizada de los resultados, debe generar líneas de contorno detalladas que permitan observar directamente cómo se comportan las soluciones en la región bajo estudio. Esta representación gráfica facilitará la interpretación del potencial eléctrico en cada nodo de la malla y reforzará la comprensión del método de diferencias finitas.

Finalmente, los resultados para los errores absolutos demuestran un aumento significativo para los últimos datos numéricos experimentales, indicando mayor discrepancia hacia los valores bajos. Los errores relativos también muestran un incremento considerable, especialmente en el par de datos mínimos en los extremos del modelo experimental para el potencial eléctrico, como 1.898 V y 0.9489 V.

V. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales y numéricos permiten obtener una solución para el potencial eléctrico en una región cuadrada finita, en el marco del problema planteado. Esta solución refleja los errores calculados por el algoritmo en

REFERENCIAS

MATLAB, lo que permite evaluar la precisión del modelo y su capacidad de aproximación frente a las condiciones reales. Se aprecia una notable similitud en los resultados correspondientes a los bordes centrales, especialmente en las medias y medianas de ambos conjuntos de datos, que presentan valores cercanos. Esta concordancia estadística sugiere que el modelo numérico ofrece una aproximación adecuada al comportamiento promedio observado experimentalmente, reproduciendo con corrección la tendencia global de los valores medidos en la región analizada. Además de presentar ciertas discrepancias en las escalas utilizadas, particularmente en la escala numérica, los datos computacionales exhiben una resolución más fina que la obtenida experimentalmente. Esta capacidad de resolución más fina en el modelo numérico permite identificar gradientes de potencial eléctrico que, por limitaciones instrumentales o condiciones experimentales, no se manifiestan con la misma claridad en las mediciones físicas. Por ello, al comparar ambos enfoques, es fundamental considerar no solo los valores obtenidos, sino también la escala y sensibilidad con la que fueron registrados, ya que estas diferencias pueden condicionar la interpretación y validación del modelo. La variedad de datos obtenidos, tanto de carácter experimental como numérico, presenta discrepancias en los valores pequeños del potencial eléctrico, mientras que los valores altos muestran una coincidencia casi exacta entre ambos conjuntos. Esta divergencia en los promedios pequeños puede atribuirse a factores adicionales involucrados en la ejecución del análisis, tales como la sensibilidad instrumental, las condiciones de contorno o la resolución espacial del modelo. La comparación lineal, junto con las gráficas de barras del error absoluto y relativo, complementa la interpretación del análisis y permite identificar con claridad las zonas del dominio donde el modelo presenta mayor o menor precisión. Esta visualización conjunta facilita la evaluación espacial del desempeño numérico frente a los datos experimentales. Finalmente, en función de los resultados obtenidos, algunas sugerencias para un mejor análisis pueden ser: mayor refinamiento en el modelo numérico mediante una menor discretización para tener mayor precisión en las áreas donde el paso es más alto; definición de factores experimentales en la simulación. El método aplicado demuestra que el modelo numérico se ajusta en función de los datos proporcionados experimentalmente, presentando algunas diferencias que pueden ser corregidas mediante un enfoque experimental de mayor rigor. Esta retroalimentación entre simulación y medición permite afinar el comportamiento del modelo y mejorar su capacidad de representación física.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad de Guanajuato y a las autoridades de la Escuela de Nivel Medio Superior Centro Histórico León y de Guanajuato, por todo el apoyo recibido en el desarrollo de este trabajo educativo.

- [1] Cilleruelo, L. & Zubiaga, A., *Una aproximación a la Educación STEAM. Prácticas educativas en la encrucijada arte, ciencia y tecnología*, Jornadas de Psicodidáctica **18**, 1-18 (2014).
- [2] de la Portilla, J. G. P., May, C. H. L., Chí, M. R. C., Vela, J. A. M. & Pacheco, M. J. K., *Implementación de prototipos didácticos de robótica como estrategia de enseñanza en la educación básica: Implementation of robotic didactic prototypes as a teaching strategy in basic Education*, LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades **5**, 913-922 (2024).
- [3] Greca Dufranc, I. M., Ortiz Revilla, J. & Arriassecq, I., *Diseño y evaluación de una secuencia de enseñanza-aprendizaje STEAM para Educación Primaria*, Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias **18**, 1-20 (2021).
- [4] Zeidler, D. L., *STEM education: A deficit framework for the twenty first century? A sociocultural socioscientific response*, Cultural Studies of Science Education **11**, 11-26 (2016).
- [5] Robinson, K., *Out of Our Minds: Learning to be Creative* by Robinson, (Ken, USA, 2011).
- [6] Colucci-Gray, L., Burnard, P., Gray, D. & Cooke, C., *A critical review of STEAM (science, technology, engineering, arts, and mathematics)*, (Oxford research encyclopedia of Education, UK, 2019).
- [7] Ortiz-Revilla, J., Adúriz-Bravo, A. & Greca, I. M., *A framework for epistemological discussion on integrated STEM education*, Science & Education **29**, 857-880 (2020).
- [8] Colucci-Gray, L., Burnard, P., Gray, D. & Cooke, C., *A critical review of STEAM (science, technology, engineering, arts, and mathematics)*, (Oxford research encyclopedia of Education, UK, 2019).
- [9] Canfarotta, D. & Pipitone, M., *An International case study: The metaverse in the classical high school*, Pedagogical Perspective, 41-58 (2024).
- [10] Santillán-Aguirre, P., Jaramillo-Moyano, E., Hernández-Andrade, L. & Santos-Poveda, R., *ABP and STEAM as Active Learning Methodologies El. ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of STEAM*, 764-779 (2023).
- [11] Castro, A., Díaz, B., Aguilera, C., Prat, M. & Chávez-Herting, D., *Identifying Rural Elementary Teachers' Perception Challenges and Opportunities in Integrating Artificial Intelligence in Teaching Practices*, Sustainability **17**, 2748 (2025).
- [12] Solier, P. M. S. & Soto, V. V., *Educación artística STEAM en la formación universitaria. Robótica creativa para la alfabetización visual y digital*, European Public & Social Innovation Review **9**, 1-20 (2024).
- [13] Flores-Velásquez, C. H., Olivares-Zegarra, S., Dávila-Ignacio, C., Arévalo-Tuesta, J. A., Morales-Romero, G., Trinidad-Loli, N., Caycho-Salas, B., Aybar-Bellido, I., Arones, M. & Aldana-Trejo, F., *A bibliometric review of studies about the acceptance of artificial intelligence technologies in teaching and learning in higher education*,

