

# Análisis de elementos finitos para el campo eléctrico y magnético en subestaciones eléctricas

Joseph Sosapanta Salas<sup>1</sup>  
Institución Universitaria Pascual Bravo  
[j.sosapantasa@pascualbravo.edu.co](mailto:j.sosapantasa@pascualbravo.edu.co)

Fecha de recepción: 20 de agosto de 2023  
Fecha de aprobación: 06 de diciembre de 2023



**Cómo citar este artículo:** Sosapanta Salas, J.(2023). Análisis de elementos finitos para el campo eléctrico y magnético en subestaciones eléctricas. *Revista Ontare*, 11, (páginas). DOI:

## Resumen

En este documento se presenta la solución de campo eléctrico y magnético, empleando el método de los elementos finitos para el caso de una subestación eléctrica de 110 kV. Esta subestación tiene la particularidad de contar con varias terrazas, lo cual implica que los resultados se presentan por tramos para la evaluación de los requerimientos normativos. A partir de simulaciones realizadas mediante el programa COMSOL Multiphysics, se encontró que los resultados de campo eléctrico y magnético para la subestación bajo estudio, se encuentran por debajo de los valores límite de exposición de campos electromagnéticos establecidos por la normatividad pertinente.

**Palabras clave:** análisis de elementos finitos; análisis electromagnético; campos eléctricos; campos magnéticos; sistemas de potencia; subestaciones eléctricas.

\*\*\*\*\*

## Finite element analysis for the electric and magnetic field in electrical substations

## Abstract

This document presents the solution of the electric and magnetic field, using the finite element method, for the case of a 110 kV electrical substation. This substation has the particularity of having several terraces, which implies that the results are presented in sections for the evaluation of regulatory requirements. From the simulations obtained with the COMSOL Multiphysics software, it was found that the electric and magnetic field results for the substation under study are below the exposure limit values for electromagnetic fields established by the relevant regulations.

**Keywords:** Electric fields; electromagnetic analysis; finite element analysis; magnetic fields; power systems; power stations.

\*\*\*\*\*

---

<sup>1</sup>Docente. Grupo de Investigación e Innovación Ambiental – GIIAM. Institución Universitaria Pascual Bravo. Ingeniero electricista y Magíster en ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Administración. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2035-9323>

## 1. Introducción

Las subestaciones eléctricas desempeñan un papel fundamental en la infraestructura de suministro de energía, ya que facilitan la transmisión eficiente de electricidad desde las centrales generadoras hasta los consumidores finales. Estas instalaciones cumplen la crucial función de transformar los niveles de voltaje, permitiendo la transmisión a largas distancias con mínimas pérdidas de energía. Además, las subestaciones también posibilitan la distribución adecuada de la electricidad a diferentes sectores, adaptándose a las diversas demandas de carga. Su importancia radica en garantizar la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico, gestionando la calidad del suministro y facilitando la integración de fuentes de energía (Krieg y Finn, 2019).

En el interior de una subestación eléctrica, se generan campos eléctricos y magnéticos como consecuencia del flujo de corriente y la manipulación de la tensión. Los campos eléctricos surgen debido a diferencias de potencial entre puntos dentro de la instalación, mientras que los campos magnéticos son generados por la corriente eléctrica que fluye a través de conductores y la presencia de equipos magnéticos como transformadores. Estos fenómenos pueden afectar a equipos y dispositivos sensibles, por lo que se requiere un diseño cuidadoso y la implementación de medidas de mitigación, como la ubicación estratégica de equipos y el uso de materiales y blindajes adecuados, para garantizar la operación segura y eficiente de la subestación eléctrica (Penagos, 2021).

La complejidad inherente a la geometría de una subestación eléctrica exige la aplicación de métodos numéricos, como un enfoque práctico para el cálculo de los campos eléctrico y magnético. La topología intrincada de los componentes presentes en una subestación, como transformadores, interruptores y barrajes, crea situaciones donde las soluciones analíticas convencionales resultan impracticables. En este contexto, los métodos numéricos ofrecen una herramienta eficaz al permitir la discretización de la geometría compleja en elementos más manejables, facilitando así la resolución de ecuaciones diferenciales y la obtención de resultados precisos. Estos enfoques computacionales no solo abordan la dificultad inherente a la geometría, sino que también posibilitan la evaluación de diversas configuraciones y

escenarios, contribuyendo así a un diseño y operación más seguros y eficientes de las subestaciones eléctricas (Sadiku, 2018).

Este problema ha sido abordado en las siguientes investigaciones, por ejemplo, Aponte *et al.* (2001), desarrollaron mediciones de campos electromagnéticos en subestaciones eléctricas y se comparan dichos resultados con simulaciones de los perfiles de los campos. Fuentes y Perico (2011), revisaron las regulaciones colombianas sobre exposición al campo eléctrico de líneas de alta tensión, comparando los valores con las normativas internacionales. Li *et al.* (2013), examinaron los campos eléctricos de frecuencia industrial alrededor de una subestación de alta tensión. Se presentan mediciones detalladas en el área de 1000 kV, y la mayoría de los valores observados están por debajo de los niveles de referencia en las directrices de diseño nacionales. Betancur y Suárez (2015), presentaron un modelo basado en los potenciales vectoriales magnéticos para calcular el campo magnético en una subestación eléctrica. Koliushko *et al.* (2023a), propusieron un método de cálculo para medir con precisión la distribución de campo eléctrico en instalaciones eléctricas, estableciendo tiempos seguros de permanencia para el personal en una subestación de 110/6 kV. Saleem *et al.* (2023), midieron los campos electromagnéticos de baja frecuencia cerca de líneas de transmisión, abordando factores técnicos para el desarrollo de una red.

En particular, empleando el método de los elementos finitos, el tema ha sido tratado en las siguientes investigaciones. Barros y da Costa (2013), utilizaron simulaciones computarizadas para analizar el comportamiento de campo eléctrico en una subestación de alta tensión, evaluando su conformidad con niveles legislativos y determinando voltajes inducidos. Munteanu *et al.* (2017), evaluaron las interferencias de campo electromagnético a través de mapas de monitoreo, con base en estándares y modelos computacionales avanzados. Amórtegui (2012), determinó el nivel de campo electromagnético en una subestación eléctrica, dando cumplimiento a los límites establecidos en la normatividad. Lunca *et al.* (2018), examinó los campos eléctricos y magnéticos generados por líneas de transmisión de 400 kV. Se discuten las distribuciones de campos y se validan los resultados mediante un enfoque analítico cuasiestático. Mohd Sawi *et al.* (2022), simularon los campos magnéticos en una subestación de 275 kV, centrándose en la propagación y fuerza de ondas magnéticas

en diferentes condiciones. Koliushko *et al.* (2023b), desarrollaron un método analítico para calcular la fuerza de campo eléctrico generado por barras colectoras de subestaciones de alta tensión. Feng *et al.* (2022), realizaron un análisis de campo electrostático en una subestación encapsulada de alta tensión.

Este documento presenta las principales ecuaciones que deben ser resueltas para calcular los campos eléctrico y magnético junto con la metodología de solución. Luego, se indican los límites máximos permisibles para los campos eléctrico y magnético según la normatividad respectiva. Posteriormente, se describe el caso de estudio y las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo las simulaciones. Finalmente, se presentan los resultados para los campos eléctrico y magnético, verificando que el máximo valor obtenido en cada caso en un plano ubicado a un metro de altura sea inferior al establecido por la normatividad pertinente.

## 2. Marco teórico - antecedentes

Los campos eléctricos y magnéticos resultan de la interacción entre cargas eléctricas, ya sea en estado de reposo o en movimiento. Estos campos pueden ser estacionarios o variables en el tiempo, dependiendo de la naturaleza de la fuente que los origina. En líneas generales, la determinación de los campos eléctrico y magnético implica resolver las ecuaciones de Maxwell, las cuales están sujetas a condiciones de frontera establecidas por la configuración del problema específico. Estas ecuaciones pueden expresarse de forma integral o diferencial, siendo esta última presentada en la ecuación (1):

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}\tag{1}$$

Donde  $\vec{E}$ : es la intensidad de campo eléctrico [V/m],  $\vec{D}$ : la densidad de campo eléctrico [C/m<sup>2</sup>],  $\vec{H}$ : la intensidad de campo magnético [A/m],  $\vec{B}$ : la densidad de campo magnético [T],  $\vec{J}$ : la densidad volumétrica de corriente [A/m<sup>2</sup>],  $\rho$ : la densidad volumétrica de carga [C/m<sup>3</sup>].

En una subestación eléctrica, los campos que se producen tienen una frecuencia baja que se asume igual a la frecuencia industrial (60 Hz); en este caso los campos electromagnéticos se pueden analizar individualmente como el campo eléctrico (debido a los voltajes) y el campo magnético (debido a las corrientes). El foco de esta investigación consiste en determinar la magnitud de la intensidad de campo eléctrico  $|\vec{E}|$  y la magnitud de la densidad de campo magnético  $|\vec{B}|$  en el área de la subestación sobre un plano ubicado a un metro de altura.

Los valores obtenidos de campo eléctrico y magnético se deben contrastar con los valores límite de exposición propuestos en el título 3 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), indicados en la tabla 1.

**Tabla 1.** Valores límite de exposición a campos electromagnéticos

Tipo de exposición	Intensidad de campo eléctrico [kV/m]	Densidad de flujo magnético [ $\mu$ T]
Exposición ocupacional en un día de trabajo de ocho horas.	8,3	1000
Exposición del público en general.	4,16	200

**Fuente.** Ministerio de Minas y Energía (2013).

Para el caso de una subestación eléctrica, se debe garantizar que los valores de campo eléctrico y magnético sobre un plano ubicado a un metro de altura, sean inferiores a 8,3 kV/m y 1000  $\mu$ T, respectivamente.

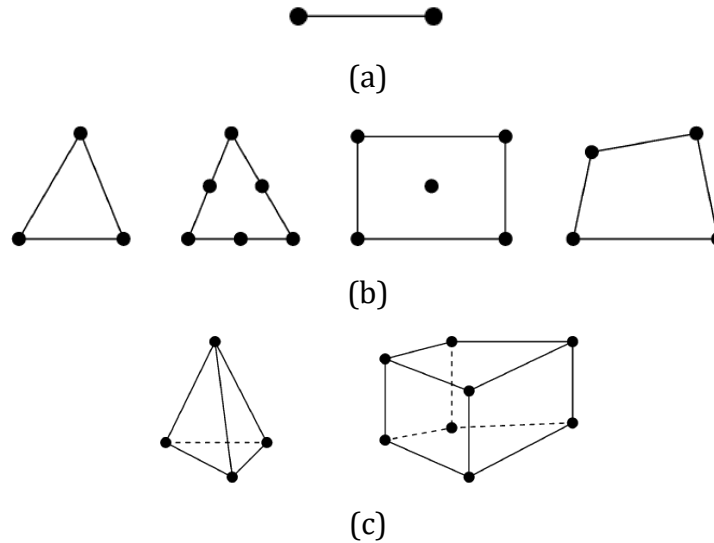
### 3. Materiales y métodos

Ante la complejidad de las subestaciones eléctricas, se propone emplear la metodología de elementos finitos para evaluar los campos eléctrico y magnético. La aplicación de esta técnica permite modelar con precisión fenómenos eléctricos y magnéticos en estructuras complejas, brindando información crucial para la optimización del diseño y la mejora de la eficiencia en las subestaciones eléctricas. Esta técnica resuelve numéricamente ecuaciones diferenciales parciales sobre geometrías complejas y abarca cuatro pasos (Sadiku, 2018):

1. Discretizar la región de solución en un número finito de subregiones o elementos.
2. Derivar las ecuaciones que rigen el comportamiento de un elemento típico.
3. Montar todos los elementos en la región de solución.
4. Resolver el sistema de ecuaciones obtenido.

En la figura 1 se muestran algunos elementos finitos típicos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales, los cuales son empleados en la etapa de discretización, donde la magnitud de los campos electromagnéticos no induce variaciones significativas en la configuración de los elementos finitos. Esto se debe a que la robustez del método permite una representación estable de las estructuras geométricas bajo distintas condiciones de campo.

**Figura 1.** Elementos finitos típicos: (a) unidimensionales, (b) bidimensionales, (c) tridimensionales



**Fuente.** Sadiku (2018).

Sin embargo, las alteraciones más relevantes en la precisión y estabilidad del modelo surgen cuando se consideran dimensiones reducidas en la geometría de la subestación. Específicamente, los elementos más pequeños y detallados de la subestación requieren un refinamiento más preciso de la malla para capturar adecuadamente las variaciones en el campo electromagnético.

En este marco, el programa COMSOL Multiphysics se destaca al implementar un algoritmo de discretización adaptativa, que optimiza la malla de elementos finitos en función de las características geométricas y los gradientes de campo presentes en la subestación. Este proceso de optimización dinámica selecciona los elementos finitos más adecuados para representar con precisión la geometría y las condiciones de borde específicas del problema. La técnica no solo se adapta a la complejidad geométrica, sino que también responde a los requerimientos de campo electromagnético, ajustando la densidad de la malla en las regiones donde se anticipan mayores variaciones de campo, lo que resulta en una solución más precisa y eficiente en términos computacionales.

Este enfoque asegura que, incluso en entornos con geometrías complejas y campos electromagnéticos intensos, el método de los elementos finitos mantenga su eficacia y precisión, proporcionando una herramienta poderosa para la modelación y análisis de sistemas electromagnéticos en subestaciones y otros entornos similares.

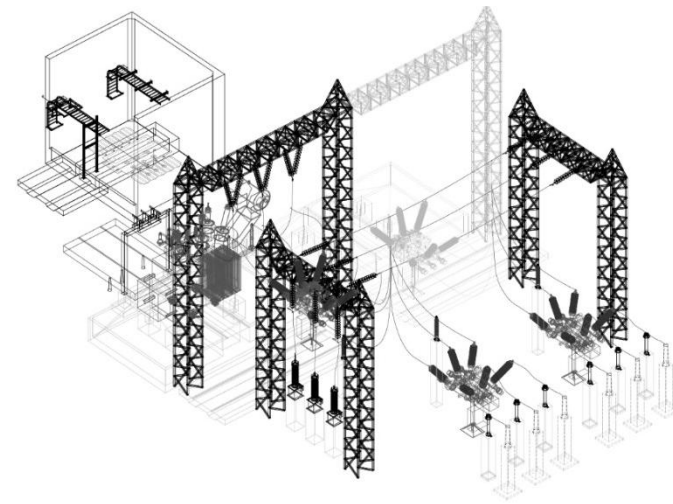
#### **4. Resultados y discusión**

En esta fase, es fundamental destacar que las simulaciones realizadas se basaron en las dimensiones reales de la subestación, así como los conductores de fases y guarda, empleados en los barrajes y el sistema de apantallamiento, respectivamente. La disposición singular de los equipos en terrazas a diferentes alturas implica que los planos ubicados a un metro sobre el suelo de la subestación deben considerar esta particularidad. La configuración de la subestación, extraída de los planos de vista en planta, cortes y detalles del patio, se presenta en la figura 2.

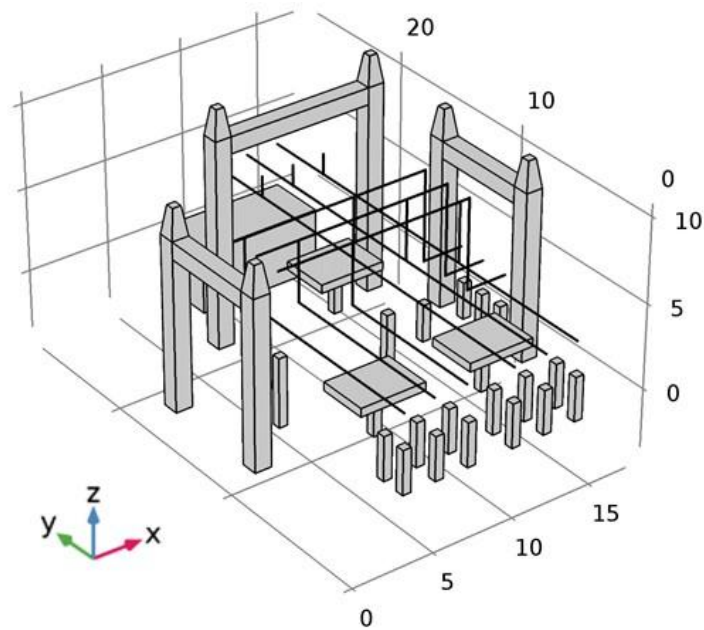
Posteriormente, es imperativo proceder a la discretización de la región de solución utilizando tetraedros, según se ilustra en la figura 3. Esta fase es crucial, ya que transforma la región continua en elementos finitos tridimensionales, brindando adaptabilidad a geometrías complejas. La elección específica de tetraedros se basa en su capacidad para capturar con precisión los fenómenos físicos, permitiendo una modelización más exacta de las propiedades del material y las condiciones de contorno. Esta estrategia de discretización mejora la eficiencia computacional y garantiza una representación detallada de los cambios en las variables clave, contribuyendo así a la precisión y fiabilidad de los resultados en el análisis.



**Figura 2.** Configuración subestación: (a) isométrico, (b) modelo de elementos finitos



(a)

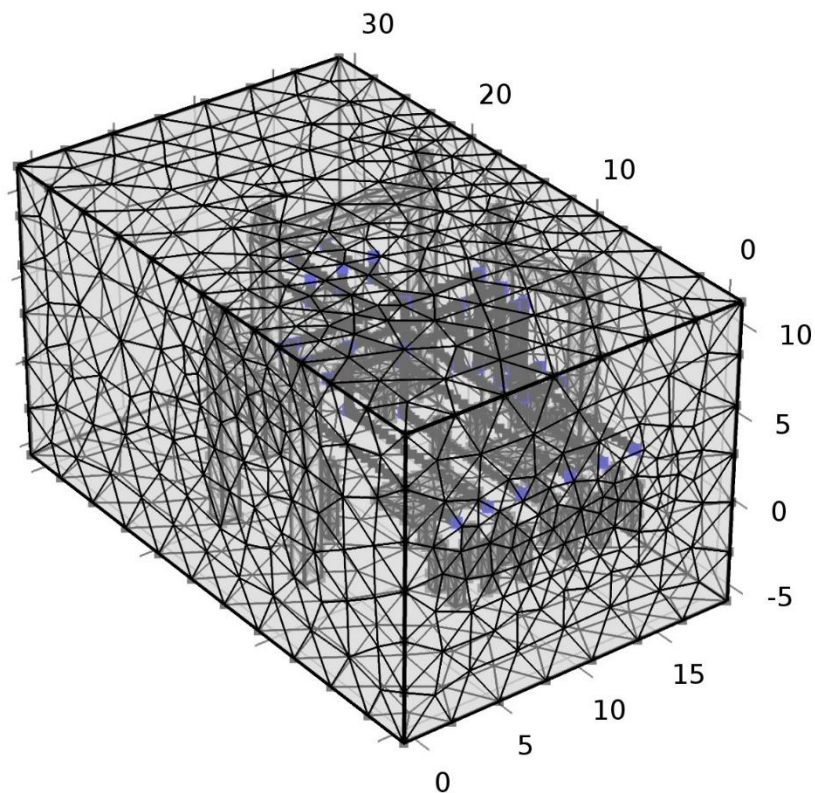


(a)

**Fuente.** Elaboración propia.

Para los propósitos de este estudio, la forma más conveniente de presentar los resultados son los planos horizontales ubicados a un metro del suelo de la subestación, teniendo en cuenta las diferentes alturas de las terrazas. La distribución de los campos en el plano horizontal se presenta en una escala de colores correspondiente a los diferentes niveles de campo calculados. El valor máximo obtenido en dichos planos horizontales para ambos campos será comparado con los límites permitidos presentados en la tabla 1. Dentro de la metodología propuesta se requiere definir las condiciones de frontera de los elementos de la figura 2. Estas condiciones de frontera se exponen en seguida para los casos de campo eléctrico y magnético, respectivamente.

**Figura 3.** Discretización de la región de solución en elementos finitos



**Fuente.** Elaboración propia.

#### 4.1. Campo eléctrico

En este caso las condiciones de frontera son:

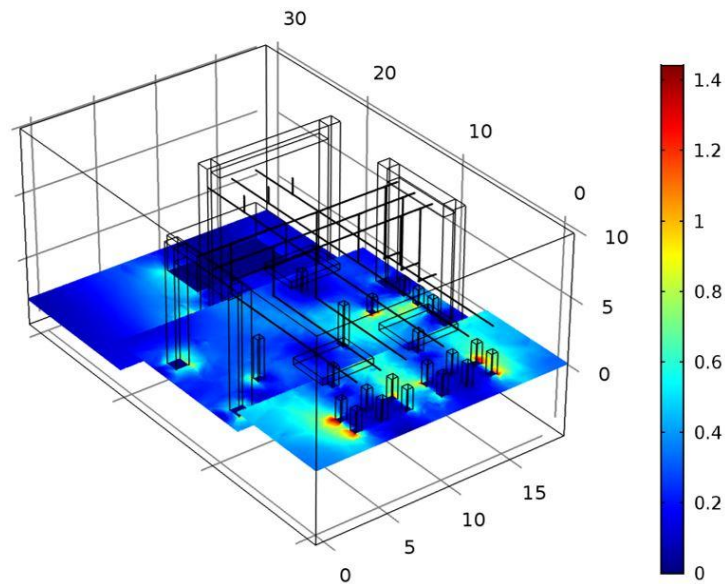
1. Tensión de referencia para los pórticos, las estructuras de los equipos y el cable de guarda. Esta se toma igual a cero voltios.
2. Tensión fases para los conductores. En cada conductor se especifica la tensión instantánea de fase, considerando la fase b en su valor máximo de tensión.

Para efectos de este estudio, interesa evaluar la magnitud de la intensidad de campo eléctrico  $|\vec{E}|$ , la cual es una medida de la fuerza que un campo eléctrico ejerce sobre una carga positiva en un punto específico. Esta variable se define como el cociente entre la fuerza ejercida sobre la carga y la magnitud de la carga. La intensidad de campo eléctrico es una cantidad vectorial, que se obtiene a partir de las componentes de campo indicadas en la ecuación (2):

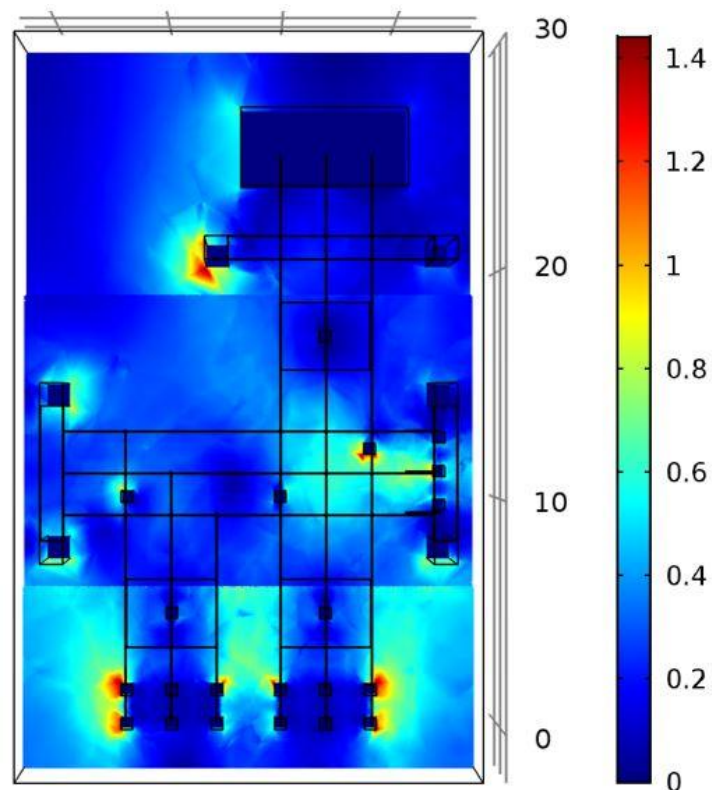
$$|\vec{E}| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (2)$$

La figura 4 muestra la distribución de  $|\vec{E}|$  para un plano ubicado a un metro del suelo de la subestación sobre cada terraza.

**Figura 4.** Resultados campo eléctrico [kV/m]: (a) vista isométrica, (b) vista en planta



(a)



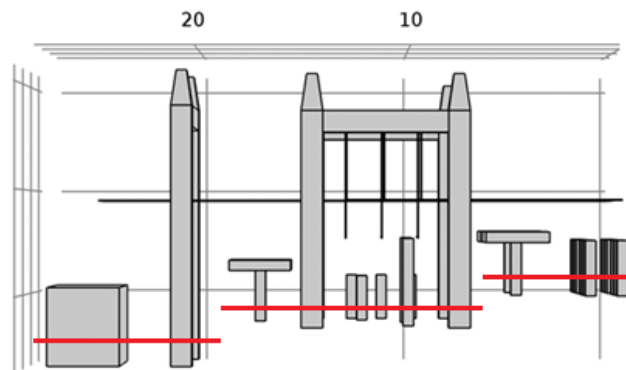
(b)

**Fuente.** Elaboración propia.

En la figura 4 se destaca que la magnitud máxima de campo eléctrico alcanza los 1,4 kV/m. Este valor significativo se localiza específicamente en la terraza más baja, próxima a los descargadores de sobretensión, donde la intensidad de campo eléctrico alcanza su valor más alto.

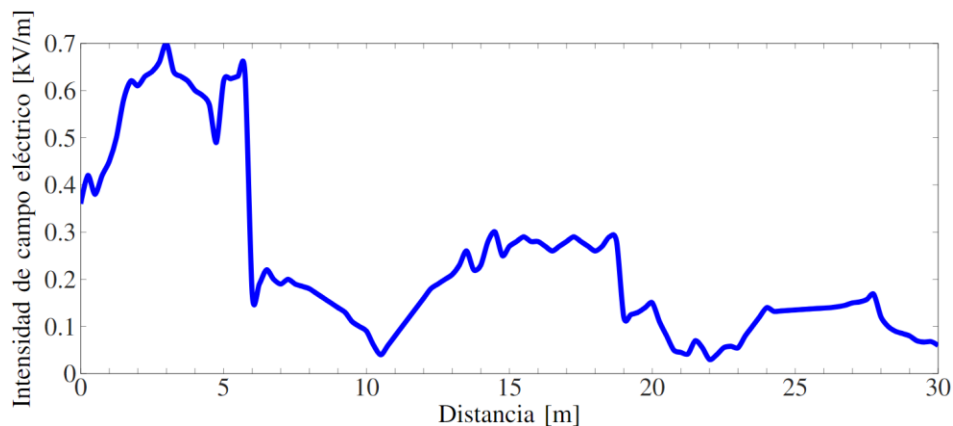
Para analizar desde otro punto de vista los anteriores resultados, se traza una trayectoria, como se muestra en la figura 5, para así obtener el perfil de campo eléctrico indicado en la figura 6. El perfil se traza a lo largo del eje y, teniendo en cuenta la altura de cada terraza y también que la única coordenada fija es  $x=8$ .

**Figura 5.** Trayectoria para perfiles de campo eléctrico y magnético



**Fuente.** Elaboración propia.

**Figura 6.** Perfil intensidad de campo eléctrico



**Fuente.** Elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio, se puede concluir que la magnitud máxima de campo eléctrico en el caso propuesto es aproximadamente de un 55 % superior a la reportada por Feng *et al.* (2022). Este aumento significativo sugiere que las condiciones experimentales o los parámetros de simulación utilizados en este trabajo han logrado intensificar el campo eléctrico de manera notable, lo que podría tener implicaciones importantes en la optimización y el diseño de sistemas que dependen de este fenómeno.

#### **4.2. Campo magnético**

En este caso la condición de frontera es la corriente de fases para los conductores. En cada conductor se especifica la corriente instantánea, considerando la fase b en su valor máximo de corriente, la cual es empleada en las simulaciones, donde es la corriente nominal de los conductores y barrajes.

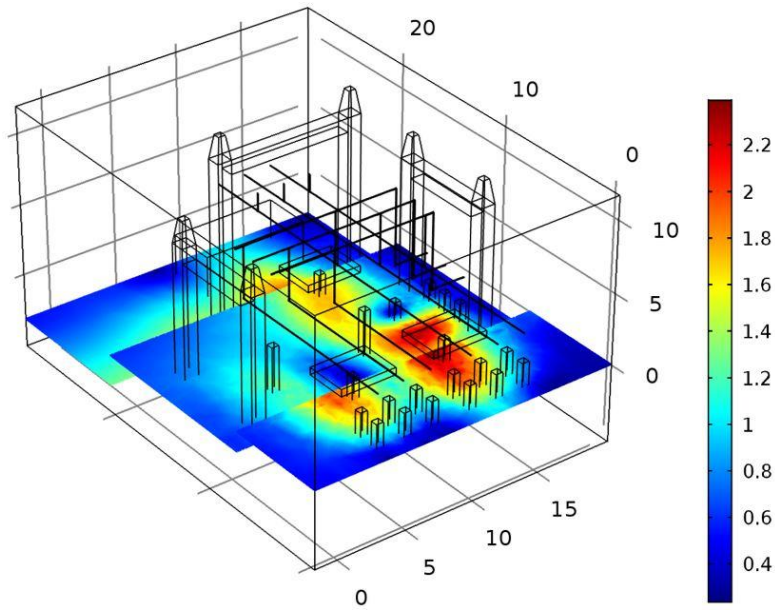
Para efectos de este estudio, interesa evaluar la magnitud de la densidad de campo magnético  $|\vec{B}|$ , la cual es una medida de la cantidad de flujo magnético que atraviesa una unidad de área perpendicular al campo en un punto determinado. La densidad de campo magnético es una cantidad vectorial, que se obtiene a partir de las componentes de campo indicadas en la ecuación (3):

$$|\vec{B}| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (3)$$

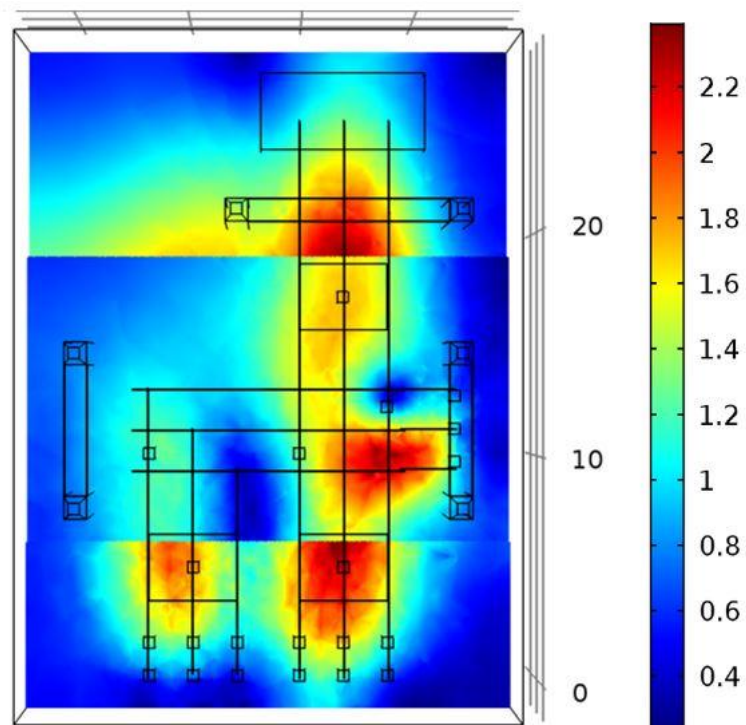
La figura 7 muestra la distribución de  $|\vec{B}|$  para un plano ubicado a un metro del suelo de la subestación sobre cada terraza. El valor máximo de la magnitud de campo magnético es 2,4  $\mu\text{T}$ . Este valor se encuentra en la zona cercana a los equipos híbridos donde el campo es más intenso.



**Figura 7.** Resultados campo magnético [uT]: (a) vista isométrica, (b) vista en planta



(a)

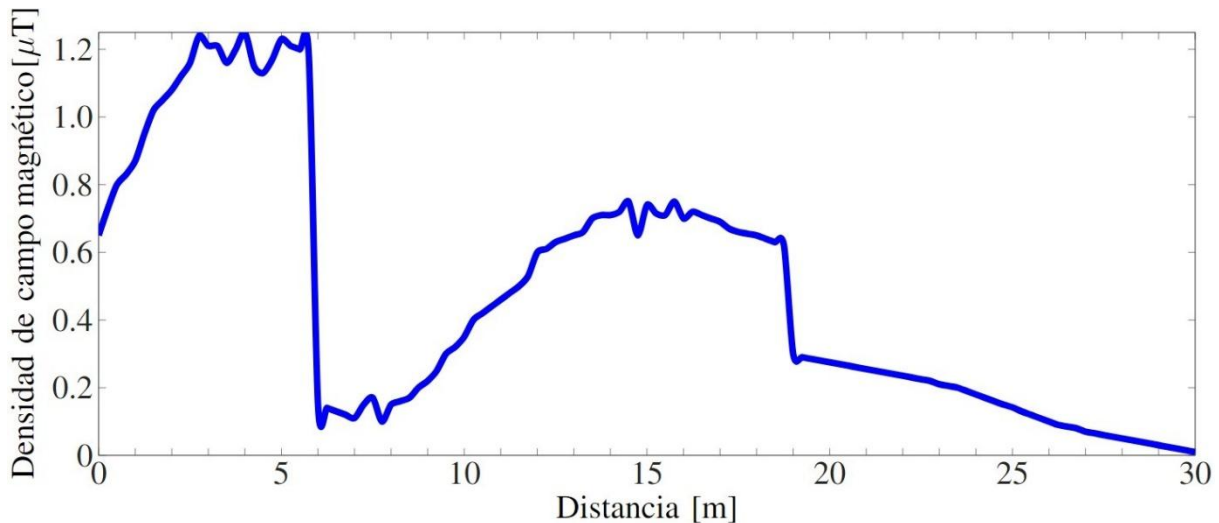


(b)

**Fuente.** Elaboración propia.

Para analizar desde otro punto de vista los anteriores resultados, se traza una trayectoria (como se muestra en la figura 5) para obtener el perfil de campo magnético indicado en la figura 8. Los perfiles se trazan a lo largo del eje y, teniendo en cuenta la altura de cada terraza y también que la única coordenada fija es  $x=8$ .

**Figura 8.** Perfil densidad de campo magnético



**Fuente.** Elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio, se puede concluir que la magnitud máxima de campo magnético en el caso propuesto es aproximadamente un 13 % superior a la reportada por Feng *et al.* (2022). Este incremento considerable indica que las condiciones experimentales o los parámetros de simulación aplicados en este estudio han potenciado el campo magnético de forma notable. Este resultado podría ser crucial para mejorar y diseñar sistemas que dependen de este fenómeno.



## 5. Conclusiones

Los resultados de las simulaciones realizadas a un metro de altura para la subestación, considerando las tres fases energizadas y con la fase b en su valor máximo de tensión, indican que el valor más alto de campo eléctrico es 1,4 kV/m, que es inferior al valor límite de exposición 8,3 kV/m propuesto en el RETIE. Por otra parte, los resultados de las simulaciones realizadas a un metro de altura para la subestación considerando las tres fases portadoras de corriente y con la fase b en su valor máximo de corriente, indican que el valor más alto de campo magnético es 2,4  $\mu$ T, que es inferior al valor límite de exposición 1000  $\mu$ T propuesto en el RETIE.

## 6. Referencias

- Amórtegui, F. (2012). *Simulación de campos electromagnéticos S/E Compartir*. Laboratorio de ensayos eléctricos industriales. Universidad Nacional de Colombia.
- Aponte, G., Bolaños, H., Cadavid, H. y Escobar, A. (2001). Medición y simulación de campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia en líneas y subestaciones. *Energía y Computación*, 10(2), 55-60. <https://hdl.handle.net/10893/1385>
- Barros, R. & da Costa, E. (2013, June 10-13). *Electric field mapping in high voltage substation using the finite elements method*. 22<sup>nd</sup> International Conference on Electricity Distribution – CIRED. Paper 1298, Stockholom.
- Betancur, E. y Suárez, M. (2015). Método para estudio de campo magnético en subestaciones. *Revista CIDET*, 13, 60-70. <http://revista.cidet.org.co/revistas/revista-13/>
- Feng, M., Wang, M., Zhang, Q., Tan, H., Li, X., Zeng, D., Yang, T. & Zhang, M. (2022). Electric field numerical analysis and structure optimization of grounding switch in GIS based on finite element analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2310, 012072. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2310/1/012072/pdf>

- Fuentes, A. y Perico, R. (2011). *Campo eléctrico en líneas de alta tensión: comparación crítica de sus valores límites de exposición teniendo como referencias la normatividad colombiana*. [Tesis de grado]. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/24842>
- Koliushko, D. G., Rudenko, S. S., Tyutyuma, S. O. & Vorobiov, B. V. (2023a). Determination of the electric field strength of high-voltage substations. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (5), 63-68. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.09>
- Koliushko, D. G., Rudenko, S. S., Kashcheiev, O. V. & Tyutyuma, S. O. (2023b). *Calculation of the Electric Field Strength on the Power Plants and Substations Territory*. IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312857>
- Krieg, T. & Finn, J. (2019). *Substations. International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Study Committee B3: Substations*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49574-3>
- Li, N., Yang, X. & Peng, Z. (2013). Measurement of Electric Fields Around a 1000-kV UHV Substation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(4), 2356-2362. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2269146>
- Lunca, E., Ursache, S. & Salceanu, A. (2018). Computation and analysis of the extremely low frequency electric and magnetic fields generated by two designs of 400 kV overhead transmission lines. *Measurement*, 124, 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.012>
- Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE*.
- Mohd Sawi, O. F., Rahim. & Baharom, M. N. (2022). FEA simulation of the propagation of magnetic field waves strength inside a 275 kV main-intake substation. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, 3(2), 374–383. <https://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/eeee/article/view/8628>
- Munteanu, C., Purcar, M., Muresan, T., Pop, A. & Rizzo, R. (2017). *Study of the electromagnetic field distribution inside a HV/MV substation*. International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania. <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974456>

Penagos, L. (2021). *Subestaciones de alta y extra alta tensión* (tercera edición). HMV Ingenieros Ltda.

Sadiku, M.N.O. (2018). *Computational electromagnetics with Matlab* (4th edition). CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/9781315151250>

Saleem, S. A., Mihoub, M., Al Hatmi, H. A. & Al Zarouni, M. I. (2023). *Investigation of Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Field of 220kV Transmission Lines in Oman*. IEEE 8th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS), Bahrain. <https://doi.org/10.1109/ICETAS59148.2023.10346480>