

Perfiles de Campos Electromagnéticos en Líneas de Transmisión Convencionales y No Convencionales

Rodrigo Espinosa Roa
Instituto Politécnico Nacional
ESIME ZAC.
Ciudad de México, MÉXICO
Email:
respinosar1700@alumno.ipn.mx

Sebastián Dalí Medina
Pérez
Instituto Politécnico Nacional
ESIME ZAC.
Ciudad de México, MÉXICO
Email:
smedinap1600@alumno.ipn.mx

Carlos Tejada Martínez
Instituto Politécnico Nacional
ESIME ZAC.
Ciudad de México, MÉXICO
Email: ctejadam@ipn.mx
URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8332-135X>

Fermín P. Espino Cortés
Instituto Politécnico Nacional
SEPI ESIME ZAC.
Ciudad de México, MÉXICO
Email: fpespino@ipn.mx
URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4853-7563>

Resumen— Este trabajo consiste en el cálculo de perfiles de campo eléctrico y campo magnético de cuatro líneas de 500 kV, dos convencionales y dos no convencionales. Los métodos analíticos para el cálculo de campos electromagnéticos generalmente son aplicables a líneas convencionales, es decir, configuraciones simétricas de haz de conductores. En este trabajo se propone abordar los casos no convencionales, es decir, líneas con configuraciones asimétricas, mediante simulaciones basadas en el método del elemento finito (MEF). Los perfiles de las cuatro líneas bajo estudio se comparan con los límites regulatorios establecidos en normas a fin de determinar la viabilidad de su instalación desde el punto de vista de la generación de campos electromagnéticos.

Palabras Clave — Campo eléctrico, campo magnético, líneas no convencionales

Abstract- This work consists of the calculation of electric and magnetic field profiles of four 500 kV lines, two conventional and two non-conventional. Analytical methods for calculating electromagnetic fields are generally applicable to conventional lines, that is, symmetrical conductor bundle configurations. This work proposes addressing non-conventional cases, that is, lines with asymmetric configurations, through simulations based on the finite element method (FEM). The profiles of the four lines under study are compared with the regulatory limits established in standards in order to determine the viability of their installation from the point of view of the generation of electromagnetic fields.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los factores a considerar en el diseño de líneas de transmisión de alta tensión es proponer configuraciones que permitan la transmisión de la mayor cantidad de potencia posible, mientras que se cumplan con los límites regulatorios de niveles de campo eléctrico y magnético establecidos en normas. En [1] se comparan algunas normas considerándose como valores comunes de referencia para campo eléctrico 5 kV/m, y para campo magnético 100 μ T. En este trabajo se calculan los perfiles de 4 líneas de transmisión de 500 kV, dos de ellas

convencionales y otras dos no convencionales. Se consideran líneas convencionales aquellas que cuentan con configuraciones simétricas de haz de conductores, es decir, en forma circular y con las mismas distancias entre conductores del haz. En cambio, se denominan líneas no convencionales aquellas que cuentan con haces de conductores con disposiciones asimétricas. Este tipo de líneas aún se encuentran bajo investigación y son de gran interés, debido a que las configuraciones optimizadas de la línea permiten la disminución de la impedancia característica y por lo tanto el aumento del SIL (Surge Impedance Loading) [2].

II. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE CAMPOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

A continuación, se describe la metodología utilizada en este trabajo. Se aplicaron dos métodos, uno analítico y otro numérico para el cálculo de campos eléctrico y magnético.

A. Método analítico para cálculo del campo eléctrico.

La siguiente metodología es extraída de [3]. El radio equivalente de un haz de conductores se calcula con:

$$r_{eq} = R \left(\sqrt[n]{\frac{nr}{R}} \right) \quad (1)$$

donde:

R: radio de la circunferencia que cruza por los centros de los conductores del haz.

n: número de conductores por fase.

r: radio del conductor.

La intensidad del campo eléctrico en un punto (y, z), en la cercanía de la línea de transmisión está determinada por la ecuación (2).

$$\vec{E} = \{\vec{E}_y, \vec{E}_z\} \quad (2)$$

Para determinar las componentes de campo eléctrico para cada eje es necesario calcular la carga eléctrica existente a partir

del valor de la tensión por fase y los coeficientes de potencial de Maxwell, estos últimos determinados por las ecuaciones (3) y (4).

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} * \ln (2h_i/R_i) \quad (3)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} * \ln (D'_{ij}/D_{ij}) \quad (4)$$

donde:

ϵ_0 : constante dieléctrica del aire.

h_i : indica la coordenada vertical del conductor.

R_i : indica el radio del conductor (radio equivalente del haz).

D_{ij} : indica la distancia entre conductores del arreglo.

D'_{ij} : indica la distancia entre el conductor y las imágenes correspondientes a los demás conductores (ver Fig. 1).

P_{ii} : coeficientes de potencial (elementos propios).

P_{ij} : coeficientes de potencial (elementos mutuos).

Con lo anterior se calcula la carga eléctrica (q) por conductor mediante la ecuación (5).

$$[q] = \begin{bmatrix} P_{ii} & \dots & P_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{ij} & \dots & P_{ii} \end{bmatrix}^{-1} [U] \quad (5)$$

Donde U es la tensión presente en los conductores.

Con lo anterior se procede al cálculo del campo eléctrico en un punto de interés (y,z), mediante las ecuaciones (6) y (7).

$$\vec{E}_y(y, z) = \sum_{i=1}^n (q_i/2\pi\epsilon_0) \left(\frac{y-y_i}{r_i^2} + \mathcal{L} \frac{y-y_i}{r_i'^2} \right) \quad (6)$$

$$\vec{E}_z(y, z) = \sum_{i=1}^n (q_i/2\pi\epsilon_0) \left(\frac{z-z_i}{r_i^2} + \mathcal{L} \frac{z+z_i}{r_i'^2} \right) \quad (7)$$

donde:

y: coordenada del punto de interés en el eje "y".

y_i : coordenada del conductor en el eje "y".

z: coordenada del punto de interés en el eje "z".

z_i : coordenada del conductor en el eje "z".

r_i : distancia al punto de interés.

r_i' : distancia a la imagen de los conductores.

La constante "L" indica el coeficiente de reflexión que cuenta el efecto del suelo en el caso de calcular el campo eléctrico en un punto. Se ha considerado (-1) en los cálculos [3]. Finalmente se obtiene la magnitud de campo eléctrico total en el punto (y, z) mediante:

$$E_{in} = \sqrt{E_{yn}^2 + E_{zn}^2} \quad (8)$$

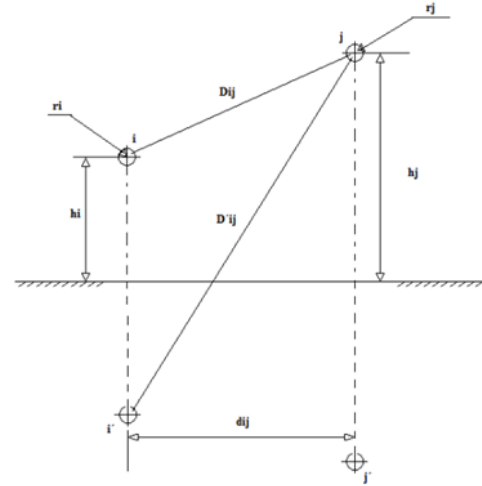


Figura 1.- Referencias geométricas para el cálculo de los coeficientes potenciales de Maxwell (método de imágenes).

B. Método analítico para cálculo del campo magnético.

La siguiente metodología para el cálculo del campo magnético fue extraída de [4]. Se debe considerar la profundidad de penetración en el terreno con la ecuación (9):

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (9)$$

donde:

δ : profundidad del reflejo (m)

ρ : resistividad del suelo (Ω)

μ : permeabilidad del suelo (H/m)

f: frecuencia (Hz)

El cálculo del campo magnético se realiza a partir de las corrientes presentes en los conductores. Cada componente vectorial tendrá una parte real y una parte imaginaria. La parte real de cada componente se obtienen con (10) y (11). La parte imaginaria de cada componente se obtienen con (12) y (13):

$$\beta_{kry} = \frac{(2\pi \cdot 10^{-7})(I_{kr})(X_m - X_k)}{D_{mk}} \quad (10)$$

$$\beta_{krz} = \frac{(2\pi \cdot 10^{-7})(I_{kr})(h_m - h_k)}{D_{mk}} \quad (11)$$

$$\beta_{kiy} = \frac{(2\pi \cdot 10^{-7})(I_{kj})(x_m - x_k)}{D_{mk}} \quad (12)$$

$$\beta_{kiz} = \frac{(2\pi \cdot 10^{-7})(I_{kj})(h_m - h_k)}{D_{mk}} \quad (13)$$

donde:

I_{kr} : componente real de la corriente.

I_{kj} : componente imaginaria de la corriente.

X_m : coordenada en el eje "Y" del punto de interés.

X_k : coordenada en el eje "Y" del conductor.

D_{mk} : distancia entre el punto de interés y el conductor.

h_m : coordenada en el eje “Z” del punto de interés.
 h_k : coordenada en el eje “Z” del conductor.

Finalmente se obtendrá la magnitud de campo magnético total en el punto de interés mediante la ecuación (14).

$$\beta = \sqrt{\beta_y^2 + \beta_z^2} \quad (14)$$

C. Método numérico para el cálculo de campo eléctrico y magnético

Los métodos analíticos expuestos en las secciones anteriores son aplicables a líneas convencionales. Para abordar los casos no convencionales, en este trabajo se hace uso del software especializado COMSOL Multiphysics, el cual está basado en el método del elemento finito (MEF). Las simulaciones fueron realizadas considerando un estudio electroestático en 2D.

III. CASOS DE ESTUDIO

En este trabajo se analizan 4 líneas de 500 kV, los datos de cada una de ellas se observan en la Tabla 1, y sus geometrías se muestran en las Figuras 2 a 5. Los casos 1 y 2 (Figuras 2 y 3) se denominan líneas convencionales ya que consisten en haces circulares y simétricos. En cambio, los casos 3 y 4 se denominan no convencionales debido a que, como se puede ver en las Figuras 4 y 5, se tienen haces asimétricos en las fases laterales.

Tabla 1.- Datos de las líneas bajo estudio

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
SIL (MW)	960.7	1328	1155	1344.9
Número de conductores por haz	4	6	4	6
Radio del conductor (cm)	1.341	1.083	1.341	1.083
Radio del haz (cm)	31.82	75	Fases laterales= 92.85 Fase central= 31.82	Fases laterales= 95.27 Fase central= 31.82

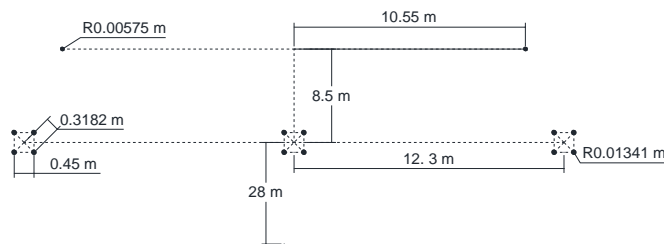


Figura 2.- Caso 1: Línea Convencional con 4 conductores por haz

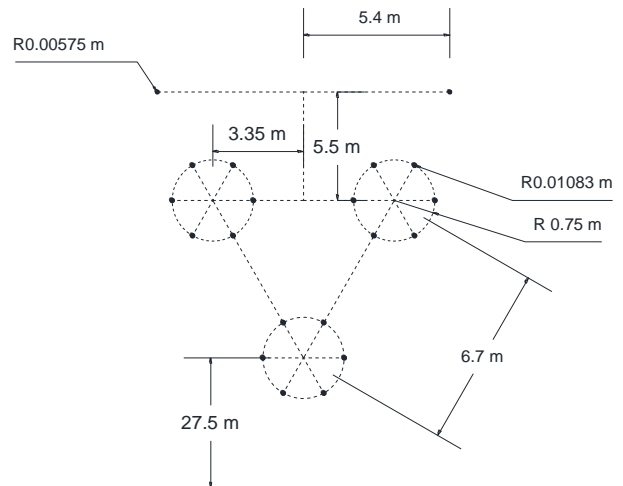


Figura 3.- Caso 2: Línea Convencional con 6 conductores por haz.

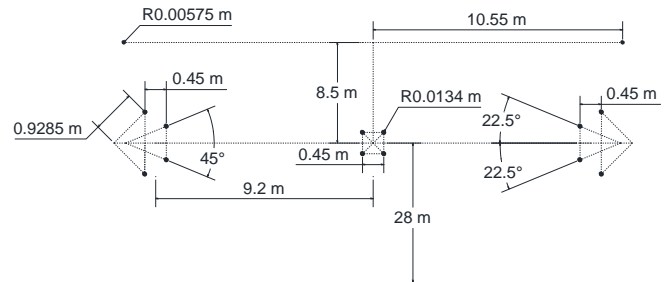


Figura 4.- Caso 3: Línea No convencional con 4 conductores por haz

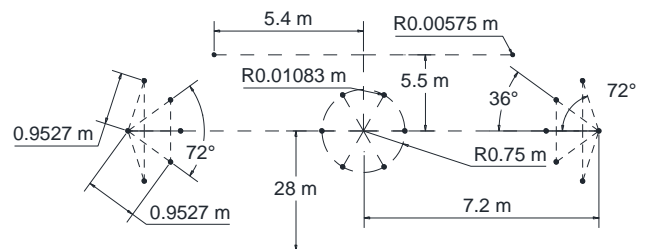


Figura 5.- Caso 4: Línea No convencional con 6 conductores por haz.

IV. RESULTADOS

En esta sección se presentan los perfiles de los campos eléctrico y magnético de los 4 casos de estudio. Se calcularon perfiles laterales de 100 m, 50 m a la izquierda y 50 m a la derecha del centro de la línea. A fin de validar el método numérico, para el caso 1 se aplicaron ambos métodos (analítico y numérico). Como se puede observar en la Fig. 6, los perfiles de campo eléctrico son los mismos para ambos métodos. Con respecto al perfil de campo magnético (Fig. 7), la diferencia entre el valor máximo obtenido con ambos métodos es de 0.3 μ T, lo cual se considera un valor no muy significativo.

En la Figura 8 se presentan los perfiles de campo eléctrico obtenidos mediante el método numérico para los 4 casos de estudio, observándose que todos ellos están por debajo de los 3 kV/m. Finalmente, la Figura 9 muestra los perfiles de campo magnético obtenidos aplicando una corriente de 1000 A en los 4 casos. La línea con el mayor nivel de campo magnético resultó ser el caso 1 con un valor de 5 μT , mientras que el caso 2 presenta ser la línea con el menor nivel de campo magnético, con 1.9 μT .

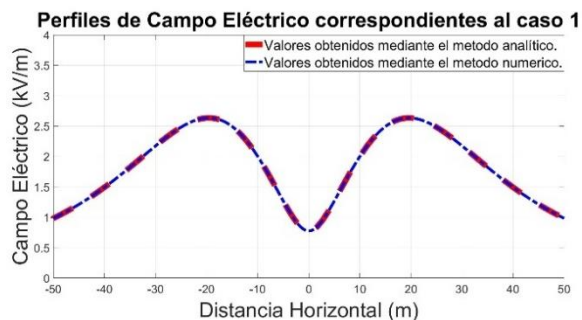


Figura 6.- Perfiles de campo eléctrico del Caso 1.

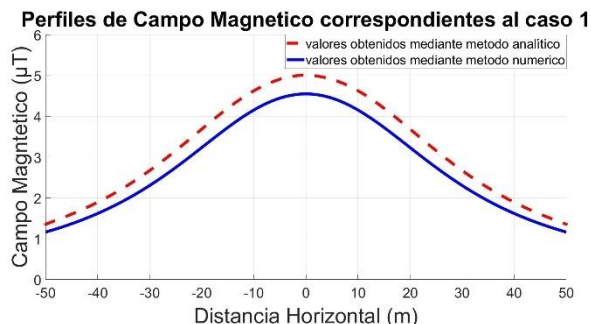


Figura 7.- Perfiles de campo magnético del Caso 1.

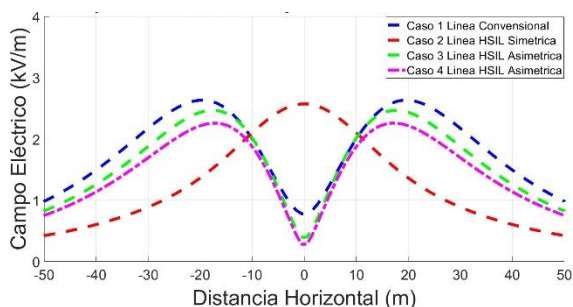


Figura 8.- Comparación de perfiles de campo eléctrico de los 4 casos.

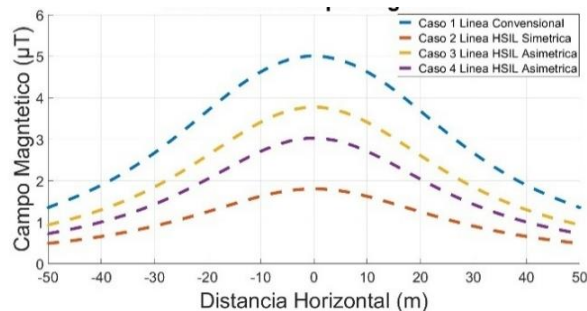


Figura 9.- Comparación de perfiles de campo magnético de los 4 casos.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron los perfiles de campo eléctrico y magnético que presentan 4 líneas de transmisión, dos convencionales y dos no convencionales. Para esto se aplicaron dos métodos de cálculo, uno analítico y uno numérico. Para el caso 1 se aplicaron ambos métodos, mostrando los mismos resultados para el campo eléctrico y una diferencia mínima para el campo magnético (0.3 μT). El método numérico cobra mayor relevancia en los casos no convencionales, en donde el método analítico ya no es aplicable, pues éste fue desarrollado para configuraciones simétricas. Los perfiles tanto de campo eléctrico como de magnético obtenidos para los casos de estudio, presentan valores por debajo de los límites establecidos en norma, 5 kV/m para campo eléctrico y 100 μT para el campo magnético. Lo anterior muestra que, desde el punto de vista de la generación de campos electromagnéticos, las líneas de transmisión no convencionales resultan ser una buena opción en la búsqueda de aumentar la capacidad de los sistemas de transmisión.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

- [1] Maja Grbic, Nada Curovic, Ivan Milanov and Aleksandar Pavlovic, "Levels of Electromagnetic Field in the Vicinity of Transmission Overhead Power Lines with Special Conductors", CIGRE Session 2024, 25 – 30 Agosto, 2024. París, Francia.
- [2] M. Ghassemi, "High Surge Impedance Loading (HSIL) Lines: A Review Identifying Opportunities, Challenges, and Future Research Needs", IEEE Xplore, vol. 34, n.o 5, 2019. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2910210
- [3] E. Arafat, B. Porkar, y M. Ghassemi, "Electric field comparison of conventional transmission line with unconventional transmission line", IEEE Xplorer, 2024. DOI: 10.1109/TPEC60005.2024.10472238
- [4] EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition. EPRI, Palo Alto, CA: 2005. 1011974.