

Analysis and calculation of the electric field stress generated in an 800 kV overhead bipolar transmission line in HVDC

Análisis y cálculo del esfuerzo de campo eléctrico generado en una línea aérea de transmisión bipolar de 800 kV en HVDC

Jorge Luis AGUILAR-MARIN¹, Luis CISNEROS-VILLALOBOS^{1*}, José Gerardo VERA-DIMAS¹

¹Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, 62209, Cuernavaca Morelos. (0000-0002-0235-6946; 0000-0002-9409-1374; 0000-0002-3880-3568)

Sent date: 26/June/2023 Acceptance date: 04/October/2023

Abstract:

The growth in the demand for electrical energy has led to the development and application of technologies that make its means of transport more efficient. Thus, one of these options is the implementation of transmission lines in HVDC. One of the parameters considered in the design of transmission lines is the distribution of their generated electric field. The following article presents the analysis and calculation of the electric field stress of a bipolar transmission line in HVDC, through the development and implementation of a methodology for teaching the calculation of the electric field stress in the corridor of a transmission line, replacing the ground plane with an image conductor identical to the conductor under study, but with opposite charge and positioning it at a distance below the ground plane. A case study of an 800 kV bipolar transmission line in HVDC is presented, the results obtained using the Field and Corona Effects (FACE) software were compared, the results are consistent with those obtained by the methodology, presenting a maximum percentage difference of 2%.

Keywords: HVDC, lines of transmission, corona effect, electric field, image conductors.

Resumen:

El crecimiento de la demanda de energía eléctrica ha llevado al desarrollo y aplicación de tecnologías que hacen más eficientes sus medios de transporte. Así, una de estas opciones es la implementación de líneas de transmisión en HVDC. Uno de los parámetros considerados en el diseño de líneas de transmisión es la distribución de su campo eléctrico generado. El siguiente artículo presenta el análisis y cálculo del esfuerzo de campo eléctrico de una línea de transmisión bipolar en HVDC, mediante el desarrollo e implementación de una metodología para la enseñanza del cálculo del esfuerzo de campo eléctrico en el corredor de una línea de transmisión, reemplazando el plano de tierra por un conductor imagen idéntico al conductor en estudio, pero con carga opuesta y posicionándolo a una distancia por

debajo del plano de tierra. Se presenta un caso de estudio de una línea de transmisión bipolar de 800 kV en HVDC, se compararon los resultados obtenidos utilizando el software Field and Corona Effects (FACE), los resultados son consistentes con los obtenidos por la metodología, presentando una diferencia porcentual máxima del 2%.

Palabras clave: HVDC, líneas de transmisión, efecto corona, campo eléctrico, conductores imagen.

* Corresponding author. E-mail: luis.cisneros@uaem.mx
Tel. 7773297039

1. Introducción

Uno de los métodos más eficientes para la transmisión de energía eléctrica es el uso de Corriente Continua de Alta Tensión (HVDC), cuando se trata de proporcionar energía eléctrica desde largas distancias a una carga grande y en continuo crecimiento (Zhu, Lee, & Pong, 2019; Feltes, Gemell & Retzmann, 2011). En comparación con el sistema de Corriente Alterna de Alta Tensión (HVAC), el sistema HVDC es más competitivo para la transmisión de energía, las interconexiones asíncronas y los cruces de cables submarinos largos (Zheng *et al.*, 2018).

A continuación se enumeran los principales beneficios técnicos de un sistema HVDC (Samy, 2017).

1. El flujo de energía es totalmente controlable, rápido y preciso.
2. El enlace en HVDC es asíncrono y puede adaptarse a cualquier tensión o frecuencia nominal.
3. Las líneas de transmisión HVDC no aumentan el nivel de cortocircuito del sistema y las fallas no se pueden transferir a través de las conexiones HVDC.
4. Hay una mejor capacidad de transmisión de energía con cables aéreos, subterráneos y submarinos.
5. El impacto visual y el uso del suelo es menor, así como el costo del corredor de la línea (Samy, 2017).

Uno de los parámetros importantes para el diseño de líneas HVDC es el campo eléctrico, el cual se caracteriza principalmente por la tensión eléctrica, la configuración espacial de la línea y por las condiciones climáticas (Straumann & Franck, 2011), la tensión eléctrica aplicada a los polos de la línea producirá una distribución de campo eléctrico como se muestra en la Figura 1 (Aguilar-Marin, *et al.*, 2020).

La altura de los polos está diseñada para mantener las corrientes de descarga por debajo de los valores de exposición recomendados para las personas inmersas en este campo y cualquier equipo que pueda encontrarse en el corredor de la línea de transmisión (Aguilar-Marin, *et al.*, 2020; Glover, Sarma & Overbye, 2012).

Algunos países han adoptado límites recomendados para el esfuerzo del campo eléctrico, que se presentan en la Tabla 1 (IEC, 2014).

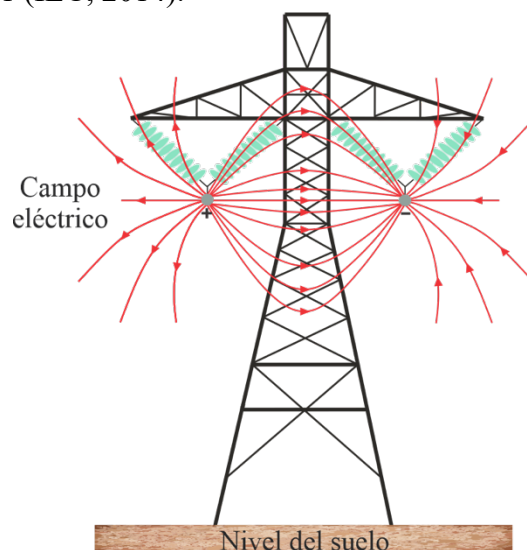


Figura 1. Campo eléctrico generado en una línea de transmisión.

Tabla 1. Valores de campo eléctrico a nivel del suelo.

País	Valor del campo eléctrico en kV/m
USA	30
Canadá	25
Brasil	40

De acuerdo con (Maruvada, 2000), un diseño aceptable debería limitar la tensión del campo eléctrico a nivel del suelo a 25 kV/m .

Cabe señalar que estos límites sólo se establecen desde el punto de vista de la percepción humana.

1.1. Efecto corona

Cuando el campo eléctrico en la superficie del conductor excede un valor crítico, conocido como corona, gradiente de inicio, el aire circundante se ioniza, dando lugar a la formación del efecto corona (Zhu, Lee, & Pong, 2019).

Las cargas del espacio iónico se generan en las proximidades de un conductor cuando se produce una descarga corona. Para las líneas de transmisión de HVDC, los iones migran al medio ambiente y al suelo bajo la acción de la fuerza del campo eléctrico porque la polaridad de sus polos es fija. En presencia de iones, el campo eléctrico a nivel del suelo puede fortalecerse, debido a la interacción de la carga espacial y la carga del conductor original, dando lugar al campo eléctrico combinado (Feltes, Gemmell & Retzmann, 2011).

La Figura 2 muestra la distribución del flujo del campo iónico y las áreas del espacio de carga de una línea de transmisión bipolar de HVDC (Zhu, Lee, & Pong, 2019). Los campos

eléctricos tienen la menor distorsión alrededor de las posiciones centrales porque las influencias de iones positivos y negativos de los efectos corona se neutralizan (IEC, 2014).

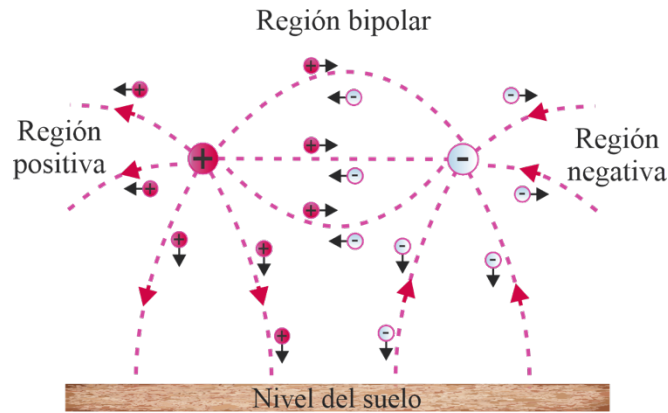


Figura 2 Distribución del flujo del campo iónico.

La Figura 3 muestra el comportamiento del esfuerzo del campo eléctrico bajo una línea de transmisión bipolar con y sin efecto corona.

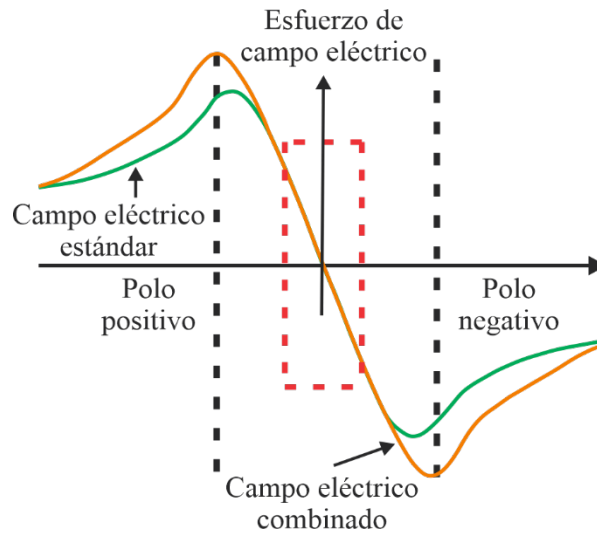


Figura 3 Esfuerzo del campo eléctrico bajo una línea de transmisión bipolar de HVDC.

(Clairmont, *et al.*, 1989; Maruvada, *et al.*, 1981) Han demostrado que incluso cuando se desprecia el efecto corona y el efecto de la carga espacial, los resultados de la tensión del campo eléctrico se han logrado con una buena aproximación.

Por lo tanto, el estudio presentado proporciona una metodología de referencia, que contiene los pasos necesarios para realizar el cálculo de tensión de campo eléctrico para líneas de transmisión aéreas monopolares y bipolares en HVDC.

2. Materiales y Métodos

2.1. Metodología de cálculo del esfuerzo de campo eléctrico

La siguiente metodología permite calcular los componentes del esfuerzo de campo eléctrico en el corredor de una línea aérea de transmisión en HVDC. El esfuerzo de campo eléctrico se obtiene aplicando un análisis bidimensional de la línea de transmisión, asumiendo polos paralelos sobre el nivel del suelo, considerando la configuración espacial de la línea, la longitud del corredor de la línea, el número de conductores por polo, el radio del conductor y la tensión nominal de la línea.

La metodología presentada ignora el efecto corona en los conductores y el efecto de la carga espacial. En base a la metodología se llevarán a cabo los pasos que se describen a continuación; la metodología considera diversas variables, estas se presentan en la Figura 4 (Aguilar-Marin, *et al.*, 2020).

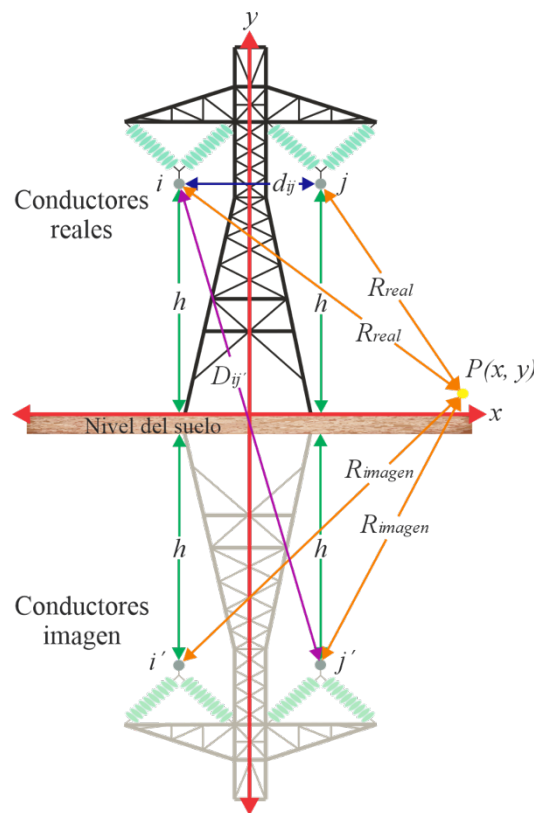


Figura 4 Definición geométrica de variables.

Donde (h) representa la altura de los polos reales i, j y los polos imagen i', j' , (d_{ij}) distancia entre los polos reales i, j , ($D_{ij'}$) distancia entre el polo real i y el polo imagen j' , (P) punto donde se desea conocer el esfuerzo de campo eléctrico, el cual estará ubicado en las coordenadas x, y , que representan los ejes horizontal y vertical respectivamente, (R_{real})

distancia entre los polos reales i, j , al punto P , (R_{imagen}) distancia entre los polos imagen i', j' , al punto P . Todas las distancias se consideran en metros.

Inicialmente se obtiene la matriz de potencial de *Maxwell* $[P]$ para líneas monopolares y bipolares. El rango de la matriz dependerá del número de conductores por polo (n), de esta forma tendremos el orden de $n \times n$, que se expresa mediante la ecuación (1) (Deltuva & Lukocius, 2020; CIGRE, 2014; Fisher, Alvarez, & Gibson, 2020).

$$[P] = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \cdots & P_{2n} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & \cdots & P_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Los elementos de la diagonal principal están formados por el propio potencial de *Maxwell* del conductor del polo, y se determina mediante la ecuación (2) (Maruvada, 2000).

$$P_{ii} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{2 \cdot h}{r_i} \right) \quad (2)$$

P_{ii} Representa los potenciales propios de *Maxwell* para el conductor por polo y se expresa en m/F , ϵ_0 representa la constante de permitividad eléctrica del vacío y tiene un valor de $8.854187 \times 10^{-12} F/m$, r_i radio del conductor por polo, en caso de que el polo esté constituido por un arreglo de múltiples conductores, se considera el radio equivalente, el cual se determina mediante la ecuación (3) (Maruvada, 2000).

$$r_e = \sqrt[n]{r_i \cdot n \left(\frac{s}{2 \cdot \text{sen} \left(\frac{\pi}{n} \right)} \right)^{n-1}} \quad (3)$$

Siendo r_e el radio equivalente del arreglo del conductor del polo expresado en m , s es la separación entre los conductores que componen el arreglo, n número de conductores que existen en el arreglo. Los potenciales de *Maxwell* que se encuentran fuera de la diagonal principal corresponden al potencial entre los conductores i, j , y se determinan mediante la ecuación (4).

$$P_{ij} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{D_{ij'}}{d_{ij}} \right) \quad (4)$$

P_{ij} Es el potencial de *Maxwell* entre los polos i y j reales, expresado en m/F . Las distancias $D_{ij'}$ y d_{ij} se determinan con las ecuaciones (5) y (6) respectivamente.

$$D_{ij'} = \sqrt{(x_i - x_{j'})^2 + (y_i + y_{j'})^2} \quad (5)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (6)$$

Las coordenadas x_i, y_i , representan las coordenadas horizontal y vertical del polo real i , las coordenadas $x_{j'}, y_{j'}$, representan las coordenadas horizontales y verticales del polo imagen j' , mientras que las coordenadas x_j, y_j , representan las coordenadas horizontales y verticales del polo real j , todas las unidades de las coordenadas se expresan en m . Una vez obtenida la matriz de potencial de *Maxwell*, se obtiene la matriz de tensión eléctrica $[V]$. La tensión eléctrica del polo se considerará positiva cuando se evalúe en el polo positivo y negativa cuando se considere en el polo negativo. Su expresión será como se muestra en la ecuación (7), en unidades de kV (Deltuva & Lukocius, 2020).

$$[V] = \begin{bmatrix} V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

El siguiente paso es obtener la matriz de cargas eléctricas $[\lambda]$ que se expresa en C/m , la cual se obtiene a partir de la ecuación (8).

$$[\lambda] = [P^{-1}] \cdot [V] \quad (8)$$

Una vez obtenida la matriz de carga eléctrica $[\lambda]$, se puede obtener el esfuerzo de campo eléctrico $[E]$, el cual se representa por sus componentes E_x, E_y , respectivamente. El cálculo del esfuerzo de campo eléctrico se determina en cualquier punto dentro del corredor de la línea, para ello se debe fijar un punto P , de esta forma el esfuerzo de campo eléctrico está en función de la ubicación de dicho punto. El cálculo del esfuerzo de campo eléctrico se determina con las ecuaciones (9) y (10) respectivamente y se expresará en kV/m .

$$E_x = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left(\frac{x - x_i}{(R_{real})^2} - \frac{x - x_i}{(R_{imagen})^2} \right) \quad (9)$$

$$E_y = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left(\frac{y - y_i}{(R_{real})^2} - \frac{y + y_i}{(R_{imagen})^2} \right) \quad (10)$$

Las distancias R_{real} y R_{imagen} se determinan a partir de las ecuaciones (11) y (12) respectivamente (Carsimamovic, *et al.*, 2019).

$$R_{real} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (11)$$

$$R_{imagen} = \sqrt{(x - x_{i'})^2 + (y + y_{i'})^2} \quad (12)$$

Las coordenadas $x_{i'}$, $y_{i'}$, representan las coordenadas horizontal y vertical del polo imagen i' , estas coordenadas se expresan en m .

El esfuerzo de campo eléctrico calculado en cualquier punto P en el corredor de la línea de transmisión, presentará componentes horizontales y verticales E_H , E_V , que se obtienen de las ecuaciones (13) y (14) respectivamente (Helmer & Jünger, 2021).

$$E_H = \sum_{i=1}^u E_x \quad (13)$$

$$E_V = \sum_{i=1}^u E_y \quad (14)$$

El esfuerzo de campo eléctrico total E_T en el punto de medición P , se obtiene aplicando la ecuación (15). (IEEE, 2002) Recomienda que el cálculo del esfuerzo de campo eléctrico se realice a 1 m sobre el nivel del suelo del corredor de la línea de transmisión.

$$E_T = \sqrt{(E_H)^2 + (E_V)^2} \quad (15)$$

2.2. Caso de estudio

Se considera una línea de transmisión bipolar con una configuración horizontal de 800 kV en HVDC presentada en (Zhou, *et al.*, 2017), que transmite una potencia de 3000 MW , donde se desea calcular el esfuerzo de campo eléctrico a un metro sobre el nivel del suelo, sobre un corredor de línea de 100 m . El conductor utilizado es un ACSR 1590 que tiene un radio de 0,01911 m . La Figura 5 presenta la configuración ADC-1 de la torre de transmisión, la distancia entre los polos y su ubicación sobre el nivel del suelo.

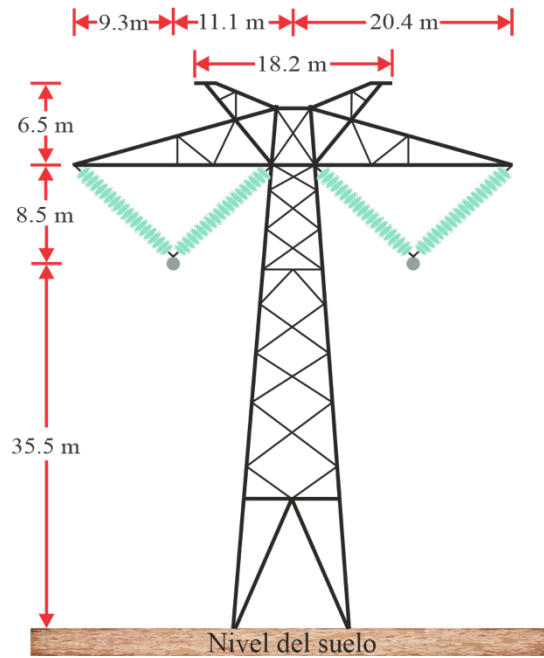


Figura 5 Línea bipolar de 800 kV en HVDC.

Para obtener una validación de la metodología presentada, se realiza el modelado y simulación de la línea de transmisión en estudio, para ello se utilizó el software FACE, ya que permite la configuración de los perfiles de las líneas de transmisión. El software utiliza el método de penetración compleja, mediante el método de Carson (Maruvada, 2000), que consiste en la circulación de una corriente que regresa por tierra, considerando el terreno como un superconductor, con lo cual se modela el retorno de la corriente por el suelo. A diferencia de la metodología presentada, el software FACE utiliza el efecto de la carga espacial.

La Tabla 2 y la Figura 6 presentan el análisis comparativo de los resultados obtenidos entre la metodología presentada y el software FACE.

Tabla 2 Análisis comparativo de los resultados obtenidos entre la metodología y el software FACE.

Esfuerzo de campo eléctrico		
Coordenadas	Metodología, en kV/m	FACE, en kV/m
$P(x = 0, y = 1)$	$E_T = 0.1880$	$E_T = 0.1842$
$P(x = 10, y = 1)$	$E_T = 1.6819$	$E_T = 1.6482$
$P(x = 20, y = 1)$	$E_T = 2.4156$	$E_T = 2.3672$
$P(x = 30, y = 1)$	$E_T = 2.2636$	$E_T = 2.2183$
$P(x = 40, y = 1)$	$E_T = 1.7739$	$E_T = 1.7384$
$P(x = 50, y = 1)$	$E_T = 1.2985$	$E_T = 1.2725$

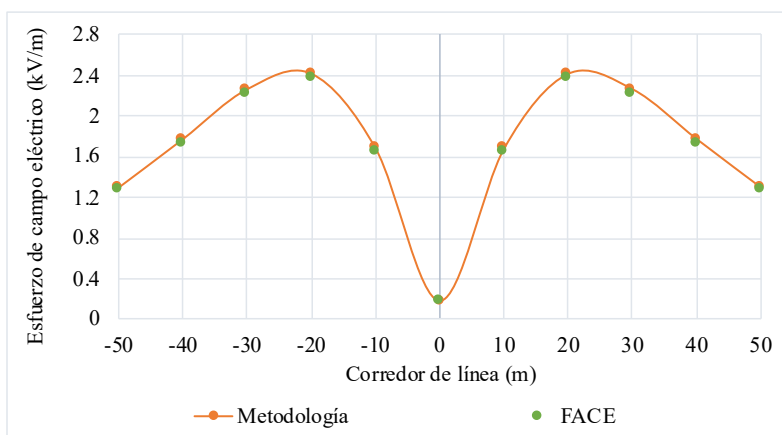


Figura 6 Análisis comparativo de los resultados entre la metodología y el software FACE.

Los resultados obtenidos presentan una diferencia porcentual promedio máxima del 2%, debido a que el software utiliza el efecto de la carga espacial y la metodología propuesta no lo considera ya que el efecto es tan pequeño que se puede despreciar, lo anterior confirma la precisión de la metodología propuesta.

3. Resultados y Discusión

Se presenta el análisis del impacto de la configuración de la línea en el esfuerzo de campo eléctrico. Los aspectos económicos para la construcción de una línea de transmisión se presentan en la compra del corredor de línea, esto está influenciado por la geometría de la estructura, una reducción en el tamaño de la torre reduce los límites del corredor, en este sentido, busca encontrar la configuración más adecuada en base al esfuerzo de campo eléctrico mediante la reducción del corredor de línea, con el uso de la metodología propuesta. A continuación, se presenta el análisis de la configuración ADC propuesta en (Zhou, *et al.*, 2017), típicamente utilizada en líneas de transmisión bipolares de 800 kV.

3.1. Configuración ADC

La Tabla 3 muestra las coordenadas de los polos para las configuraciones ADC-2 y ADC-3, reduciendo la distancia entre los ejes de los polos (x, y) en un 20 y 40% a partir de la configuración ADC-1 de la línea de transmisión en estudio.

Tabla 3 Coordenadas de las configuraciones ADC-2 y ADC-3, de la línea de transmisión.

Configuración	Conductor	Eje x, en m	Eje y, en m
ADC-2	Polo positivo	-8.88	28.4
	Polo negativo	8.88	28.4
ADC-3	Polo positivo	-6.66	21.3
	Polo negativo	6.66	21.3

Realizando el procedimiento de la metodología con la configuración ADC-2 y ADC-3 de la línea de transmisión presentada en la Tabla 3, se obtienen los resultados del esfuerzo de campo eléctrico mostrados en la Figura 7.

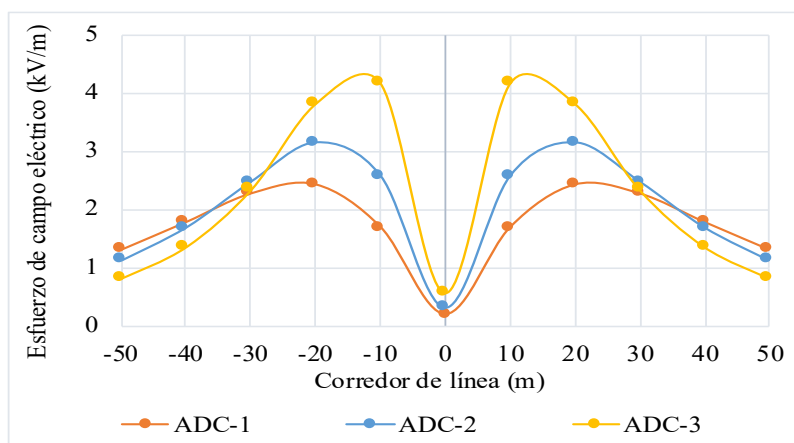


Figura 7 Esfuerzo de campo eléctrico de las configuraciones ADC-1, ADC-2 y ADC-3.

En la Figura 7 se observa el cambio del esfuerzo de campo eléctrico, de las configuraciones presentadas, en función de las dimensiones de la torre y la posición de los puntos de medición P . La configuración ADC-3 genera una mayor magnitud de esfuerzo de campo eléctrico en comparación con las configuraciones ADC-1 y ADC-2, pero se encuentra dentro de los valores de operación recomendados en (Maruvada, 2000). La configuración presenta una reducción en altura y una menor separación entre sus polos, generando una reducción económica en su instalación. Debido a esto, se verifica que la configuración ADC-3 tiene el mayor esfuerzo de campo eléctrico pero un posible menor costo económico.

3.2. Configuración BDC

Con el fin de determinar una configuración eficiente, se analiza el comportamiento del esfuerzo de campo eléctrico de una línea de transmisión con configuración vertical, presentada en (Zhou, *et al.*, 2017). La Figura 8 muestra la configuración BDC-1 de la línea, la distancia entre los polos y su ubicación sobre el nivel del suelo. Las características de operación de la línea son idénticas a las presentadas en el caso de estudio anterior.

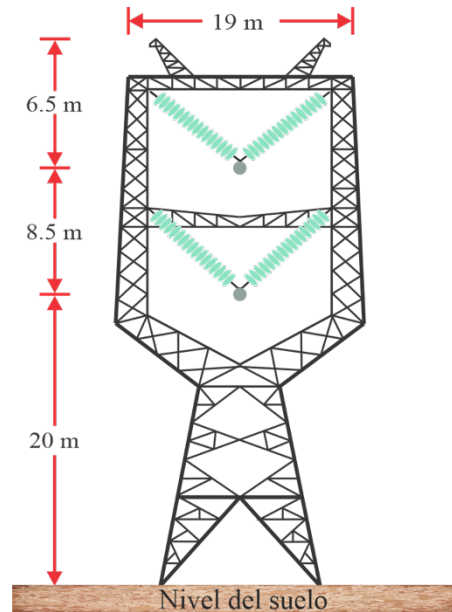


Figura 8 Línea bipolar de 800 kV en HVDC.

La Tabla 4 presenta las coordenadas de los polos para las configuraciones BDC-2 y BDC-3, reduciendo en un 20 y 40% la distancia entre los ejes (y) de los polos, a partir de la configuración BDC-1 de la línea con configuración vertical.

Tabla 4 Coordenadas de las configuraciones BDC-2 y BDC-3, de la línea de transmisión.

Configuración	Conductor	Eje x , en m	Eje y , en m
BDC-2	Polo positivo	0	22.8
	Polo negativo	0	16
BDC-3	Polo positivo	0	17.1
	Polo negativo	0	12

Realizando el procedimiento metodológico con las configuraciones BDC-1, BDC-2 y BDC-3 de la línea de transmisión que se presentan en la Figura 8 y en la Tabla 4, se obtienen los resultados del esfuerzo de campo eléctrico, los cuales se presentan en la Figura 9.

En la Figura 9, se observa que la configuración BDC-3 genera una mayor magnitud de esfuerzo de campo eléctrico en comparación con las configuraciones BDC-1 y BDC-2, pero se encuentra dentro de los valores de operación recomendados en (Maruvada, 2000), la configuración presenta una reducción en altura, generando una reducción económica en su instalación. Debido a esto, se verifica que la configuración BDC-3 tiene el mayor esfuerzo de campo eléctrico pero un posible menor costo económico.

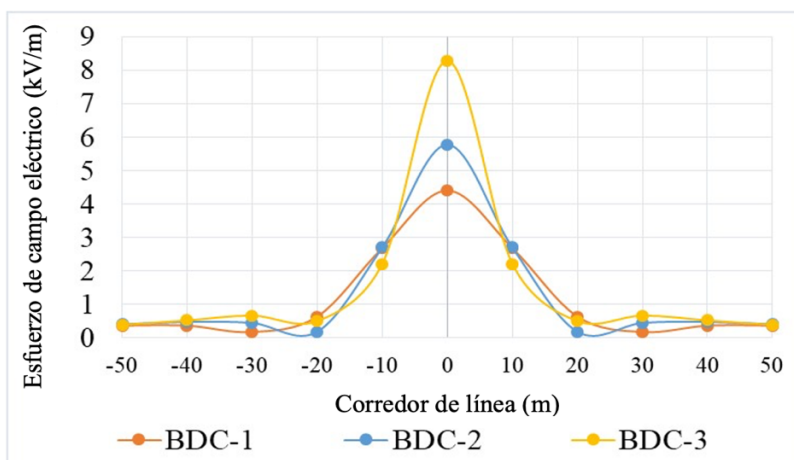


Figura 9 Esfuerzo de campo eléctrico de las configuraciones BDC-1, BDC-2 y BDC-3.

Analizando los resultados obtenidos por la configuración ADC-3 y BDC-3, se determina que la configuración más eficiente es BDC-3, debido a que la torre tiene una altura menor, reduciendo los límites del corredor de la línea de transmisión, la configuración BDC-3 no presentará problemas de campo eléctrico.

4. Conclusiones

Se obtiene una metodología de referencia, que contiene los pasos necesarios para calcular el esfuerzo de campo eléctrico en líneas de transmisión aéreas en HVDC. El esfuerzo del campo eléctrico se obtiene aplicando un análisis bidimensional de la línea de transmisión, considerando las características de operación de la línea. La metodología presentada puede ser aplicada en líneas bipolares y monopolares, admitiendo las diferentes tensiones nominales de las líneas en HVDC, permitiendo calcular el esfuerzo del campo eléctrico a una altura entre los polos y el nivel del suelo, sobre el corredor de la línea de transmisión. El perfil del esfuerzo del campo eléctrico de la línea de transmisión bipolar de 800 kV en HVDC fue modelado y validado con el software FACE, con el cual se obtuvo una diferencia porcentual media máxima del 2%, lo anterior confirma la precisión de la metodología propuesta. Las Figuras 7 y 9 muestran que el aumento de la altura de los polos es el parámetro más eficiente para reducir el esfuerzo del campo eléctrico a nivel del corredor de la línea de transmisión. Se determina que las configuraciones en estudio no presentarán problemas de campo eléctrico, ya que los resultados están por debajo del límite máximo recomendado.

5. Referencias

Aguilar-Marin, J. L., Cisneros-Villalobos, L., Padilla-Cantero, J. G. and Vergara-Vázquez, J. C. (2020). Methodology to calculate the density of the magnetic field generated in overhead transmission lines in HVDC applying a two-dimensional analysis of parallel poles above ground level. *Journal Democratic Republic of Congo*. Vol. 6, No. 11, pp. 1-11. <https://doi.org/10.35429/EJDRC.2020.6.11.1.11>

- Aguilar-Marin, J. L., Vergara-Vázquez, J. C., Padilla-Cantero, J. G. and Hernández-González, D. (2020). Methodology to calculate the intensity of the electric field generated in a double circuit High Voltage Alternating Current overhead transmission line. *Journal of Quantitative and Statistical Analysis*. Vol. 7, No. 21, pp. 1-8. <https://doi.org/10.35429/JQSA.2020.21.7.1.8>
- Carsimamovic, A., Mujezinovic, A., Bajramovic, Z., Turkovic, I., Kosarac, M. and Stankovic, K. (2019). Origin and mitigation of increased electric fields at high voltage transmission line conductors. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. Vol. 104, pp. 134-149. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.06.049>
- CIGRE, (2014). Guide to the conversion of existing AC lines to DC operation.
- Clairmont, B. A., Johnson, G. B., Zaffanella, L. E. and Zelingher, S. (1989). The Effect of HVAC-HVDC Line Separation in Hybrid Corridor. *IEEE Power Engineering Review*. Vol. 9, No. 4, pp. 95-96. <https://doi.org/10.1109/MPER.1989.4310636>
- Deltuva, R. and Lukocius, R. (2020). Distribution of Magnetic Field in 400 kV Double-Circuit Transmission Lines. *Applied Sciences*. Vol. 10, No. 9, pp. 1-10. <https://doi.org/10.3390/app10093266>
- Feltes, J. W., Gemmell, B. D. and Retzmann, D. (2011). From Smart Grid to Super Grid: Solutions with HVDC and FACTS for grid access of renewable energy sources. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039346>
- Fisher, A., Alvarez, J. and Gibson, N. L. (2020). Analysis of methods for the Maxwell-random Lorentz model. *Results in Applied Mathematics*. Vol. 8, pp. 1- 17. <https://doi.org/10.1016/j.rinam.2020.100098>
- Glover, J. D., Sarma, M. S. and Overbye, T. J. (2012). *Power system analysis and design*. Fifth edition. Cengage Learning.
- Helmer, C. and Jünger, A. (2021). Analysis of Maxwell-Stefan systems for heat conducting fluid mixtures. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*. Vol. 59, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2020.103263>
- IEC, (2014). Std. 62681, Electromagnetic performance of high voltage direct current (HVDC) overhead transmission lines.
- IEEE, (2002). Std. C95.6-2002, Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz.
- Maruvada, P. S. (2000). *Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines*. Taylor R Francis Inc.
- Maruvada, P. S., Trinh N. G., Dallaire, R. D. and Rivest, N. (1981). Corona studies for bipolar HVDC transmission at voltages between +/- 600 kV and +/- 1200 kV part 1: long-term bipolar line studies. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. 100, No. 3, pp. 1453-1461. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1981.316620>
- Samy, M. (2017). Computation of electromagnetic fields around HVDC transmission line Tying Egypt and KSA. *Nineteenth International Middle East Power Systems Conference*. pp. 1276-1280. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2017.8301345>

- Straumann, U. and Franck, C. M. (2011). Finite Element Simulation of in Ion Currents from Coronating HVDC Overhead Lines. *International Symposium on High Voltage Engineering*. pp. 22-26.
- Zheng, J., Wen, M., Chen, Y. and Shao, X. (2018). A novel differential protection scheme for HVDC transmission lines. *Electrical Power and Energy Systems*. Vol. 94, pp.171-178. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.07.006>
- Zhou, H., Qiu, W., Sun, K., Chen, J., Deng, X. et al. (2017). *Ultra-high Voltage AC/DC Power Transmission*. Springer.
- Zhu, K., Lee, W. K. and Pong, P. W. (2019). Non-contact Voltage Monitoring of HVDC Transmission Lines Based on Electromagnetic Fields. *IEEE Sensors Journal*, 19, pp. 3121-3129. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2892498>