

Cálculo de blindaje para dimensionamiento de estructuras de líneas de transmisión aéreas

Shielding calculation for sizing overhead transmission line structures

<https://cientifica.site>

Jorge Luis **Aguilar Marin**¹
Luis **Cisneros Villalobos**²
Jorge **Sánchez Jaime**³

Universidad Autónoma del Estado de Morelos,
Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería,
Cuernavaca, Morelos,
MÉXICO

¹ ORCID: 0000-0002-0235-6946 / jorge.aguilar@gmail.com

² ORCID: 0000-0002-9409-1374 / luis.cisneros@uaem.mx

Tecnológico Nacional de México,
Instituto Tecnológico de Toluca,
Metepc, Estado de México,
MÉXICO

³ ORCID: 0000-0002-4674-8247 / jsanchezj@toluca.tecnm.mx

Recibido 29/04/2025, aceptado 25/09/2025.



Resumen

Este artículo presenta una metodología para determinar el ángulo de blindaje en líneas de transmisión aéreas utilizando el modelo electrogeométrico (MEG). El objetivo es optimizar la ubicación de los cables de guarda para proteger las líneas frente a descargas atmosféricas, reduciendo fallas en el sistema eléctrico. Se analiza un caso práctico de una línea de doble circuito y dos cables de guarda operando a 230 kV. La validación se realiza mediante un código en MATLAB que calcula la ubicación óptima de los cables y una simulación con ATPDraw para modelar el impacto de una descarga de 31 kA. Los resultados muestran que el ángulo de blindaje calculado es de 25.05 grados, lo que indica una protección adecuada sin superar la tensión crítica de flameo. El estudio confirma que el diseño óptimo del blindaje mejora la fiabilidad de las líneas de transmisión frente a descargas atmosféricas.

Palabras clave: líneas de transmisión, alta tensión, flameo inverso.

2

Abstract

This article presents a methodology for determining the shielding angle in overhead transmission lines using the electrogeometric model (EGM). The objective is to optimize the placement of guard wires to protect the lines from atmospheric discharges, reducing failures in the electrical system. A practical case of a double-circuit line with two guard wires operating at 230 kV is analyzed. Validation is performed using a MATLAB code that calculates the optimal cable placement and a simulation with ATPDraw to model the impact of a 31 kA discharge. The results show that the calculated shielding angle is 25.05 degrees, indicating adequate protection without exceeding the critical flashover voltage. The study confirms that optimal shielding design improves the reliability of transmission lines against atmospheric discharges.

Index terms: transmission lines, high voltage, back flashover.

I. INTRODUCCIÓN

Las torres de líneas de transmisión sirven para mantener los conductores sobre el suelo, transfiriendo electricidad desde las fuentes de energía a las comunidades. En los últimos años, las redes de transmisión eléctrica han experimentado cambios drásticos debido a la creciente demanda energética en todo el mundo. Los nuevos tipos de conductores, la mayor concienciación pública sobre la estética y el medio ambiente, y la necesidad de líneas de mayor capacidad han generado una gran presión sobre los diseñadores para desarrollar torres económicas y con un diseño óptimo.

Se utilizan diversos tipos de torres en las redes de transmisión, incluyendo las de celosía de acero y las poligonales de acero. Sin embargo, debido a su alta relación resistencia-peso, las de celosía de acero suelen ser las preferidas por la mayoría de las empresas de servicios públicos [1].

Por otra parte, los sistemas de potencia se ven sujetos periódicamente a sobretensiones. La sobretensión en un sistema eléctrico se define como el aumento de tensión durante un periodo muy breve. También se conoce como transitorios de tensión o sobretensión. La sobretensión en un sistema eléctrico se puede clasificar en dos factores: interno (temporal, conmutación) y externo (generalmente rayos) [2]. La sobretensión en los sistemas eléctricos puede ocurrir por diversas razones, como rayos, fallas y desconexiones, siendo la más destructiva la causada por la caída de un rayo [3] [4].

Un solo rayo puede transportar tensiones de hasta 300 kV y 30 kA de corriente, lo cual es muy alto y puede causar averías en los dispositivos y el aislamiento [5]. Por lo tanto, es vital diseñar el sistema eléctrico de forma que la sobretensión esperada sea inferior al valor que el sistema puede soportar [6]. Sin embargo, un sistema de este tipo sería costoso y no sería práctico en la práctica. La mejor manera es diseñar el sistema de energía de forma que se minimicen los daños causados por la sobretensión [7].

Por lo tanto, el uso de blindaje para los sistemas eléctricos es de gran importancia ya que mediante su aplicación se busca reducir de manera significativa los daños causados por descargas atmosféricas a las líneas de transmisión. Debido a que las líneas de transmisión pasan por zonas con diferentes suelos, topografías y niveles cerámicos, el diseño del blindaje debe considerar estos factores que afectan su desempeño ante las descargas atmosféricas.

Debido a la complejidad del fenómeno de las descargas atmosféricas, se emplea el análisis estadístico probabilístico para una mejor comprensión de su incidencia a tierra en función del nivel cerámico, el cual es característico de cada región geográfica.

Las sobretensiones externas se originan por fenómenos atmosféricos, principalmente debido a rayos [8] [9]. Puede deberse a descargas directas de rayo, sobretensiones inducidas electromagnéticamente debido a descargas de rayo cerca de la línea (descarga lateral), descargas disruptivas inversas y tensiones inducidas electrostáticamente.

Este tipo de sobretensión también se conoce como sobretensión de rayo o sobretensión de frente rápido. Un rayo puede impactar generalmente en cualquier punto de un sistema eléctrico o en un objeto cercano, incluso si tiende a impactar en la estructura más alta. A diferencia de otros tipos de sobretensión, que son proporcionales a la tensión del sistema, las sobretensiones de rayo dependen de las impedancias del sistema en lugar de la tensión de este. Es prácticamente imposible, desde el punto de vista económico y práctico, proteger las líneas de distribución o de transmisión de bajo voltaje para soportar este tipo de sobretensión [7], [10].

A. Modelo electrogeométrico

Las líneas de transmisión aéreas son fundamentales en la distribución de energía eléctrica, pero están expuestas a descargas atmosféricas, especialmente rayos, lo que puede generar fallas costosas y poner en riesgo la estabilidad del sistema eléctrico. En este contexto, el blindaje de las líneas de transmisión se ha convertido en un aspecto clave del diseño de estas infraestructuras, específicamente en lo que respecta a la protección contra las descargas atmosféricas.

El Modelo Electrogeométrico (MEG) es la relación que existe entre la intensidad de corriente del rayo y la región de alcance del extremo de la descarga. Se utiliza para determinar el valor máximo estimado de la corriente de descarga del rayo que puede eludir el hilo de guarda e impactar directamente en el conductor de fase.

El MEG, basado en el concepto de distancia de impacto, es el método más eficaz para el análisis del rendimiento de las líneas de transmisión contra rayos. La distancia de impacto se refiere a la distancia crítica entre la punta del conductor descendente del rayo y el objeto impactado que provoca la falla del apantallamiento. Las distancias de impacto incluyen las distancias de impacto para el conductor de fase, el cable de apantallamiento y la tierra [11].

Este modelo considera la protección de los conductores con mayor altura en la torre, protegiendo así los niveles inferiores automáticamente como se muestra en la Fig. 1. La implementación de los cables de guarda para realizar el blindaje de la línea de transmisión se efectúa siguiendo el modelo de zonas de atracción [12].

4

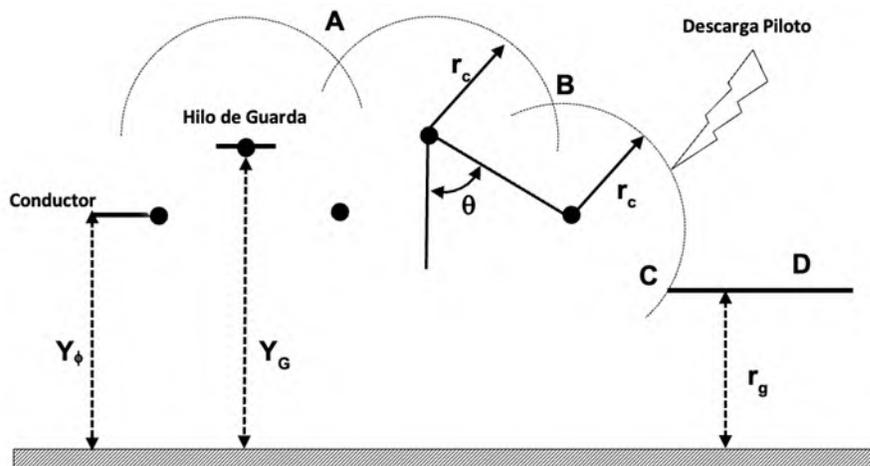


Fig. 1. Modelo electrogeométrico [12].

La respuesta de una línea de transmisión aérea a una descarga directa del rayo dependerá esencialmente del diseño, es decir, si tiene o no cables de guarda, si el impacto se produce en el conductor de fase, en la torre o en el cable de guarda.

Varios estudios han abordado la importancia de proteger las líneas de transmisión mediante el uso de cables de guarda, que se conectan a tierra para desviar las descargas y proteger los conductores de fase. Estos trabajos destacan la necesidad de un diseño adecuado del blindaje para optimizar su efectividad. El uso del MEG es una de las metodologías

más empleadas para calcular la ubicación óptima de los cables de guarda, con el objetivo de maximizar su capacidad para drenar las descargas a tierra, evitando fallas en el sistema de transmisión (C. Tort, S. Şahin, & O. Hasançebi, 2017; H. Xue & M. Popov, 2014).

Por ejemplo, el MEG se ha utilizado para analizar la respuesta de las líneas de transmisión a las descargas directas del rayo, considerando factores como la altura de los conductores y cables de guarda y el radio de atracción de las descargas. Estos estudios son esenciales para entender cómo diferentes configuraciones geométricas y las características de los cables de guarda influyen en la protección contra los rayos (Shariatinasab & Gholinezhad, 2017; Franc et al., 2016). Además, el análisis de las sobretensiones inducidas, ya sea por descargas directas o por fenómenos electromagnéticos generados por los rayos cercanos, ha sido un campo de investigación importante para mejorar la resistencia de las estructuras a estos fenómenos (Z. Yu et al., 2016; Salazar, 2013).

Otro aspecto relevante es la implementación de herramientas estadísticas y modelos probabilísticos para mejorar la comprensión de los efectos de los rayos en las líneas de transmisión. Estos métodos permiten modelar la incidencia de las descargas en función de factores geográficos, como la ubicación y el nivel ceraúnico de la región, lo cual resulta crucial para diseñar blindajes que sean efectivos en diversas condiciones climáticas y geográficas (Shafaei et al., 2012; Rodrigues et al., 2012).

Los avances tecnológicos en la medición y análisis de sobretensiones también han sido esenciales para mejorar el diseño de las líneas de transmisión. Se han empleado técnicas de medición avanzadas para evaluar las sobretensiones de rayo y su impacto en las subestaciones y otros componentes del sistema eléctrico (Li, 2018; Bjelić et al., 2019).

En resumen, la protección de las líneas de transmisión contra las descargas atmosféricas ha sido ampliamente estudiada, y el uso del Modelo Electrogeométrico ha demostrado ser una herramienta eficaz para optimizar el diseño de los blindajes. Sin embargo, la investigación continúa, especialmente en lo que respecta a la incorporación de nuevos enfoques estadísticos y tecnológicos para mejorar la precisión de los cálculos y la efectividad de los sistemas de protección en diversas condiciones de operación.

II. METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL ÁNGULO DE BLINDAJE

A continuación, se describen los pasos para determinar el ángulo de blindaje en líneas de transmisión aéreas, los cuales están en función del modelo electrogeométrico IEEE/CIGRE.

A. Cálculo de parámetros del cable de guarda y del conductor de fase para el MEG

El ángulo de blindaje está definido como el formado por la recta entre el cable de guarda, la tierra y la recta entre el cable de guarda y el conductor, tal como se muestra en la Fig. 2, el cual será negativo o positivo, dependiendo de la posición relativa entre el cable de guarda y el conductor de fase.

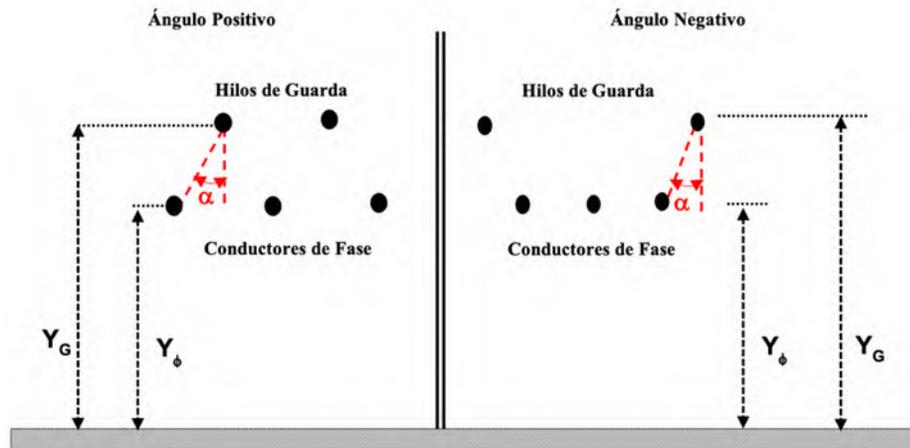


Fig. 2. Ángulo de blindaje positivo y negativo [12].

Paso 1. Calcular la altura promedio para el cable de guarda

La altura Y_G , representa la altura promedio del cable de guarda, y se calcula a través de la ecuación 1.

$$Y_G = h_g - \frac{2}{3}(h_g - h_{gw}) \quad [m] \quad (1)$$

h_g representa la altura máxima del cable de guarda (altura de enganche) en m , y h_{gw} representa la altura mínima del cable de guarda en m .

Paso 2. Calcular la altura promedio para el conductor de fase superior, con mayor exposición a la descarga

La altura Y_ϕ , representa la altura promedio del conductor de fase, y se calcula a través de la ecuación 2.

$$Y_\phi = h_\phi - \frac{2}{3}(h_\phi - h_{\phi w}) \quad [m] \quad (2)$$

h_ϕ representa la altura máxima del conductor de fase (altura de enganche) en m , y $h_{\phi w}$ representa la altura mínima del conductor de fase en m .

Paso 3. Calcular el radio del conductor de fase bajo efecto corona

El radio del conductor de fase se obtiene a través de la ecuación 3. Para dicha ecuación, se sugiere un valor de $E_0 = 1500 \text{ kV/m}$ [23].

$$R \ln \frac{2Y_\phi}{R} = \frac{V_n}{E_0} \quad (3)$$

R representa el radio del conductor de fase bajo efecto corona en m , V_n representa el voltaje aplicado al conductor en kV , E_0 representa el gradiente crítico de potencial en kV/m .

Paso 4. Determinar el radio equivalente del haz de conductores sin efecto corona

Para el cálculo del radio equivalente de un haz de conductores de fase, se emplea la ecuación 4 [12].

$$r_{eq} = \sqrt[N]{r_{11} \cdot r_{12} \cdot r_{13} \cdots r_{1n}} \quad [m] \quad (4)$$

N representa la cantidad de subconductores, r_{11} representa el radio del subconductor 1 en m , r_{1n} representa la distancia del subconductor 1 al subconductor n en m .

Paso 5. Calcular el radio total equivalente del conductor bajo efecto corona

El radio total equivalente del conductor bajo efecto corona se obtiene a través de la ecuación 5.

$$R_\phi = r_{eq} + R \quad [m] \quad (5)$$

Paso 6. Calcular la impedancia característica del conductor de fase

La impedancia característica del conductor de fase (basado en los parámetros de la línea de transmisión y la inclusión del efecto corona) se determina a través de la ecuación 6 [12].

$$Z_\phi = 60 \sqrt{\ln \frac{2Y_\phi}{r_{eq}} \cdot \ln \frac{2Y_\phi}{R_\phi}} \quad [\Omega] \quad (6)$$

Paso 7. Determinar el voltaje crítico de flameo (CFEO)

El voltaje crítico de flameo está relacionada al voltaje de aguante máximo al impulso de rayo o nivel básico de aislamiento BIL (por sus siglas en inglés “Basic Insulation Level”) para cada tensión eléctrica máxima del sistema. Se calcula mediante la ecuación 7 [23].

$$CFO = \frac{BIL}{0.961} \quad [kV] \quad (7)$$

Paso 8. Calcular la corriente mínima de falla

La corriente mínima falla I_{min} se debe considerar para conocer el valor que causa la falla en la cadena de aisladores del conductor de fase ante una descarga atmosférica, la I_{min} se obtiene a través de la ecuación 8 [12].

$$I_{min} = \frac{2 \cdot CFO}{Z_\phi} \quad [kA] \quad (8)$$

B. Cálculo del ángulo de blindaje efectivo por el MEG

La Fig. 3, muestra un modelo simplificado para analizar el mecanismo de falla en el blindaje.

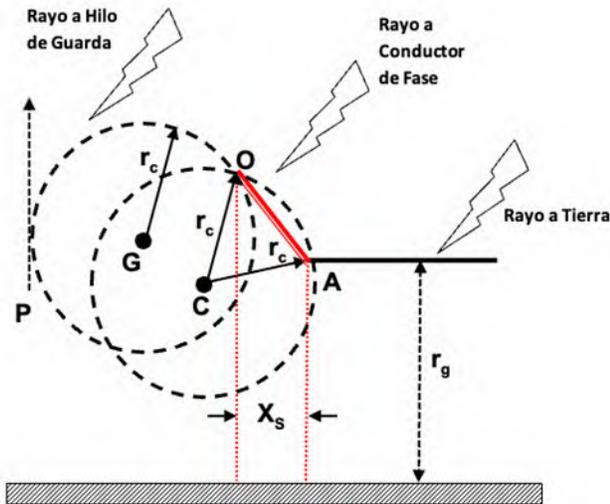


Fig. 3. Modelo de blindaje simplificado [23], [24].

Paso 9. Calcular el radio de atracción del conductor

Para calcular el radio de atracción del conductor se emplea la ecuación 9 [12].

$$r_c = 10 \cdot I_{min}^{0.65} \text{ [m]} \quad (9)$$

r_c es el radio de atracción del conductor en m .

Paso 10. Calcular el radio de atracción a tierra

Para determinar la distancia de atracción a tierra, se emplean las ecuaciones 10 y 11 de acuerdo con la altura de la torre [23] y se muestran a continuación.

Si $Y_0 < 40 \text{ m}$ entonces aplicamos la ecuación 10.

$$r_g = (3.6 + 1.7 \ln(43 - Y_0))(I_{min}^{0.65}) \text{ [m]} \quad (10)$$

Si $Y_0 \geq 40 \text{ m}$ entonces aplicamos la ecuación 11 [12].

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi} \right) [^\circ] \quad (16)$$

Paso 12. Calcular la coordenada del cable de guarda en el eje x, X_G para un blindaje adecuado de la línea de transmisión

Reduciendo a cero la coordenada X_s , para lograr un blindaje óptimo, se calcula la coordenada del cable de guarda en el eje x, a través de la ecuación 17.

$$X_G = \sqrt{r_c^2 - (r_g - Y_\phi)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - Y_{G\phi})^2} \quad (17)$$

Paso 13. Calcular el ángulo efectivo en grados

El ángulo de blindaje efectivo α_E , al cual se debe ubicar el conductor de guarda para proteger al conductor de fase ante descargas atmosféricas directas, se obtiene aplicando la ecuación 18 [12].

$$\alpha_E = \tan^{-1} \left(\frac{X_G}{Y_\phi - Y_G} \right) [^\circ] \quad (18)$$

10

III. DESARROLLO

Se considera una torre 2B2-BD de doble circuito y dos cables de guarda, la cual opera a un nivel de tensión de 230 kV, donde se desea calcular el ángulo de blindaje en la torre de transmisión. La configuración geométrica de la torre se presenta en la Fig. 5. Las características generales de los conductores y cables de guarda se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CONDUCTOR.

Características generales	
Cantidad de circuitos:	2
Cables de guarda:	2
Conductores por fase:	1
Calibre y tipo de conductor:	900 KCM, ACSR
Radio del conductor:	0.01599 m
Longitud de la cadena de aisladores:	2.71 m
Flecha del conductor:	14 m

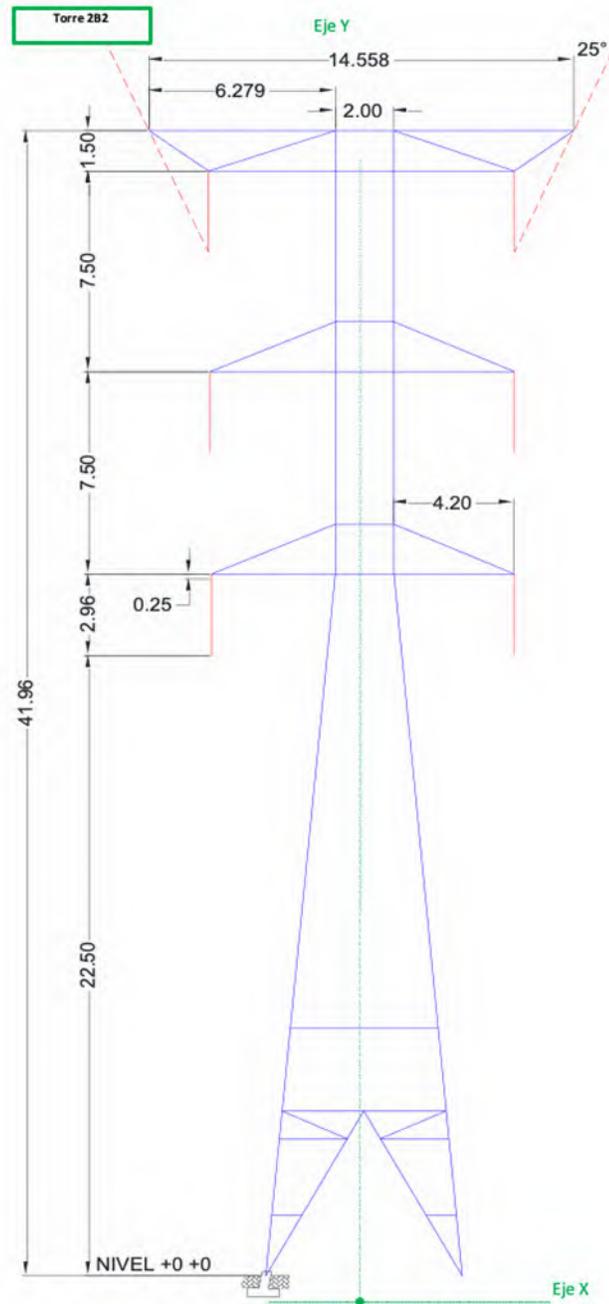


Fig. 5. Configuración geométrica de la torre 2B2.

Cálculo del ángulo de blindaje

Primeramente, se calculan las alturas promedio del cable de guarda (Y_G) y del conductor de fase (Y_ϕ).

$$Y_G = h_G - \frac{2}{3}(h_g - h_{gw}) = 41.96 - \frac{2}{3}(41.96 - 27.96) = 32.62 [m]$$

$$Y_\phi = h_\phi - \frac{2}{3}(h_\phi - h_{\phi w}) = 37.5 - \frac{2}{3}(14) = 28.16 [m]$$

A continuación, se determina el radio equivalente del haz de conductores sin efecto corona [m].

$$r_{eq} = 0.01599 [m]$$

Se calcula el radio del conductor bajo efecto corona, considerando $E_0 = 1500 [kV/m]$.

$$R \ln \frac{2Y_\phi}{R} = \frac{V_n}{E_0}, = R \ln \frac{2(28.16)}{R} = \frac{230}{1500}$$

Resolviendo por el método Newton-Rhapson se obtiene el valor de $R = 0.01921$

$$R_\phi = R_{eq} + R = 0.01599 + 0.01921 = 0.0352 [m]$$

Se calcula la impedancia característica del conductor de fase bajo efecto corona Z_ϕ .

$$Z_\phi = 60 \sqrt{\ln \frac{2Y_\phi}{r_{eq}} \cdot \ln \frac{2Y_\phi}{R_\phi}} = 60 \sqrt{\ln \frac{2(28.16)}{0.01599} \cdot \ln \frac{2(28.16)}{0.0352}} = 465.5 [\Omega]$$

Se calcula el voltaje crítico de flameo (CFO).

$$CFO = \frac{BIL}{0.961} = \frac{1050}{0.961} = 1093 [kA]$$

Se calcula la corriente mínima de falla I_{min} .

$$I_{min} = \frac{2 \cdot CFO}{Z_\phi} = \frac{2(1093)}{466.8} = 4.68 [kA]$$

Se calcula la distancia o radio de atracción de descargas atmosféricas.

$$r_c = 10(4.68^{0.65}) = 27.27 [m]$$

Si $Y_\phi < 40 m$ entonces,

$$r_g = (3.6 + 1.7 \ln(43 - 28.16))(4.68^{0.65}) = 22.32 [m]$$

Si $r_g < Y_\phi$, empleando relaciones trigonométricas tenemos que:

$$X_s = r_c [1 + \sin(\alpha - \omega)]$$

$$\omega = \cos^{-1} \frac{D_{gc}}{2r_c} = \cos^{-1} \frac{4.92}{2(27.27)} = 83.52^\circ$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{5.20 - 7.27}{32.62 - 28.16} \right) = -24.89^\circ$$

$$X_s = r_c [1 + \sin(\alpha - \omega)] = (27.27)[1 + \sin(-24.89 - 83.52)] = 0.42 \text{ [m]}$$

Se calcula la coordenada del cable de guarda en el eje x (X_G).

$$X_G = \sqrt{r_c^2 - (r_g - Y_\phi)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - Y_{G\phi})^2}$$

$$X_G = \sqrt{27.27^2 - ((22.32) - (28.16))^2} - \sqrt{27.27^2 - ((22.32) - (32.62))^2} = 1.38 \text{ [m]}$$

Se calcula el ángulo de blindaje efectivo (α_E).

$$\alpha_E = \tan^{-1} \left(\frac{X_G}{Y_\phi - Y_G} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{1.38}{28.16 - 32.62} \right) = -17.3^\circ$$

Para el cálculo del radio se emplea:

$$r_c = 8I_{\min}^{0.65} = 8(4.68)^{0.65} = 21.82 \text{ [m]}$$

Se calcula el valor de r_g con la siguiente ecuación.

$$r_g = 8I_{\min}^{0.65} = 8(4.68)^{0.65} = 21.82 \text{ [m]}$$

Dado que $r_g < Y_\phi$, se usa la siguiente expresión para calcular la zona desprotegida de la estructura de transmisión (X_s), para lo cual se tiene que:

$$X_s = r_c [1 + \sin(\alpha_s - \omega)]$$

Donde ω se determina de la siguiente manera.

$$\omega = \cos^{-1} \frac{D_{gc}}{2r_c} = \cos^{-1} \frac{4.92}{2(21.82)} = 83.52^\circ$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{5.20 - 7.27}{32.62 - 28.16} \right) = -24.89^\circ$$

$$X_s = r_c [1 + \sin(\alpha - \omega)] = (21.82)[1 + \sin(-24.89 - 83.52)] = 1.6 \text{ [m]}$$

Se calcula la ubicación del cable de guarda en el eje x (X_G). El cual se calcula con la siguiente expresión.

$$X_G = \sqrt{r_c^2 - (r_g - Y_\phi)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - Y_{G\phi})^2}$$

$$X_G = \sqrt{21.82^2 - ((21.82) - (28.16))^2} - \sqrt{21.82^2 - ((21.82) - (32.62))^2} = 1.92 [m]$$

a) Cálculo del ángulo de blindaje efectivo (α_E).

$$\alpha_E = \tan^{-1}\left(\frac{X_G}{Y_\emptyset - Y_G}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1.92}{28.16 - 32.62}\right) = -23.3^\circ$$

Como se observa el ángulo de blindaje efectivo calculado con el modelo electrogeométrico es $= -23.3^\circ$, el cuál aproximadamente coincide con el ángulo de 25° utilizado en la estructura de transmisión 2B2-BD normalizada por la Comisión Federal de Electricidad.

IV. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de validar el ángulo de blindaje efectivo de la línea de transmisión en estudio mediante el modelo electrogeométrico, se desarrolló una programación en MATLAB. El código diseñado permite determinar la ubicación óptima de los cables de guarda, con el objetivo de maximizar la protección contra descargas atmosféricas directas y minimizar las posibles fallas en el sistema eléctrico.

La Fig. 6 muestra la estructura del código implementado en MATLAB, diseñado para realizar el cálculo y la optimización de la ubicación de los cables de guarda.

14

```
% Parámetros iniciales
altura_conductor_fase_1 = 34.54; % Altura del primer conductor de fase en metros
altura_conductor_fase_2 = 30; % Altura del segundo conductor de fase en metros
altura_conductor_fase_3 = 22.5; % Altura del tercer conductor de fase en metros

altura_cable_guarda = 41.96; % Altura del cable de guarda en metros
voltaje = 230; % En KV
radio_conductor = 0.01599; % Radio del conductor en metros
numero_subconductores = 1; % Número de subconductores

% Calcular el radio equivalente de los conductores
radio_equivalente = numero_subconductores * radio_conductor;

% Función para calcular el ángulo de blindaje efectivo
function angulo = angulo_blindaje(altura_cable_guarda, altura_conductor_fase)
% Fórmula simplificada para ilustrar el cálculo del ángulo de blindaje
distancia_entre_cables = sqrt(altura_cable_guarda^2 + altura_conductor_fase^2);
angulo = atan(altura_conductor_fase / distancia_entre_cables) * (180 / pi);
end

% Función para calcular el ángulo de blindaje promedio considerando tres conductores de fase
function angulo_promedio = angulo_blindaje_promedio(altura_cable_guarda, altura_conductor_fase_1, altura_conductor_fase_2, altura_conductor_fase_3)
% Calcular los ángulos para cada conductor de fase
angulo_1 = angulo_blindaje(altura_cable_guarda, altura_conductor_fase_1);
angulo_2 = angulo_blindaje(altura_cable_guarda, altura_conductor_fase_2);
angulo_3 = angulo_blindaje(altura_cable_guarda, altura_conductor_fase_3);

% Calcular el ángulo promedio
angulo_promedio = mean([angulo_1, angulo_2, angulo_3]);
end

% Simulación del impacto de rayo considerando tres conductores de fase
function simulacion_impacto_rayo(altura_cable_guarda, altura_conductor_fase_1, altura_conductor_fase_2, altura_conductor_fase_3)
% Calcular el ángulo de blindaje promedio
angulo_promedio = angulo_blindaje_promedio(altura_cable_guarda, altura_conductor_fase_1, altura_conductor_fase_2, altura_conductor_fase_3);

% Mostrar el ángulo promedio calculado
fprintf('Ángulo de blindaje promedio calculado: %.2f grados\n', angulo_promedio);

% Simular el impacto
if angulo_promedio >= 25
disp('Blindaje óptimo logrado.');
```

Fig. 6. Código implementado en MATLAB.

La Fig. 7 muestra el ángulo de blindaje calculado, que es de 25.05 grados, lo que indica que el blindaje es óptimo.

Ángulo de blindaje promedio calculado: 25.05 grados
Blindaje óptimo logrado.

Fig. 7. Código implementado en MATLAB.

Con el objetivo de validar si el ángulo de blindaje es óptimo frente a una descarga atmosférica en el conductor de guarda de la línea de transmisión, se realizó el modelamiento de la línea utilizando el programa ATPDraw. En este modelo, se consideró una sección comprendida entre tres torres. Las características del conductor de fase y del hilo de guarda empleadas en el modelado se detallan en el desarrollo.

La Fig. 8 muestra el modelado de la descarga atmosférica sobre el conductor de guarda 1 de la torre 2.

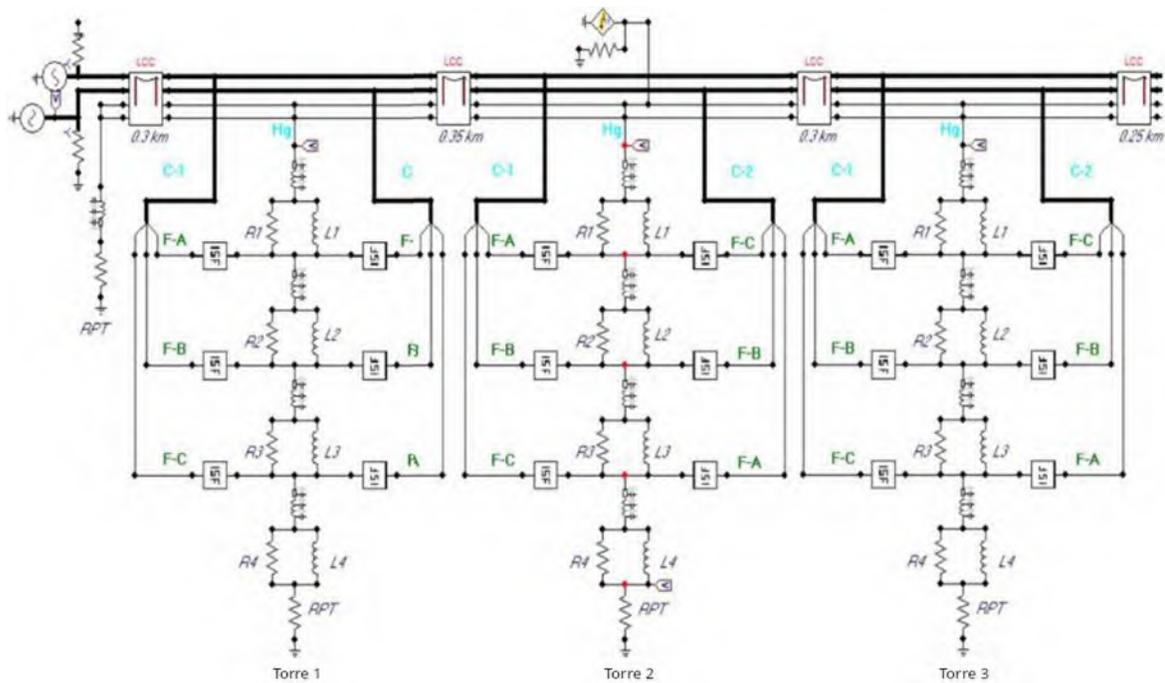


Fig. 8. Modelo de la descarga atmosférica.

Los niveles de corriente de rayo que afectan el blindaje de las líneas de transmisión, al impactar una descarga atmosférica en los conductores de guarda y generar un flameo inverso, suelen ser superiores a 20 kA. De acuerdo con el estándar IEEE Std-1243-1997, se recomienda considerar magnitudes superiores al valor promedio de 31 kA [25]. Para el desarrollo de este estudio, se empleó una corriente de impacto de rayo de 31 kA.

La Fig. 9 muestra la simulación del impacto de una descarga atmosférica en la torre 2. Se observa que las tensiones en las cadenas de aisladores de las fases de los dos circuitos no presentan flameo inverso, ya que no se supera la tensión crítica de flameo. Esto confirma que el ángulo de blindaje calculado es óptimo frente a una descarga atmosférica de 31 kA.

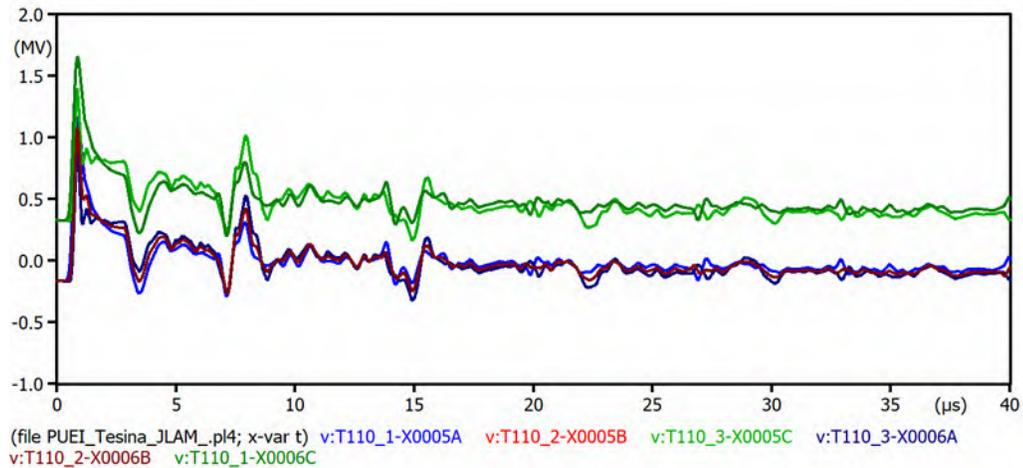


Fig. 9. Tensiones en las cadenas de aisladores de los circuitos de la torre 2.

V. CONCLUSIONES

El presente estudio ha demostrado la efectividad del Modelo Electrogeométrico (MEG) para determinar el ángulo de blindaje óptimo en líneas de transmisión aéreas, específicamente en una línea de transmisión de doble circuito con dos cables de guarda. Mediante la programación en MATLAB, se optimizó la ubicación de los cables de guarda para maximizar la protección frente a descargas atmosféricas, obteniendo un ángulo de blindaje de 25.05 grados, lo que indica que el blindaje es adecuado para evitar fallas en el sistema eléctrico.

La validación del modelo se realizó mediante el software ATPDraw, donde se simuló las condiciones de descarga atmosférica sobre los conductores de guarda. Los resultados mostraron que las tensiones en las cadenas de aisladores no superaron el valor crítico de flameo, confirmando que el diseño del blindaje es eficaz frente a descargas de 31 kA. Los hallazgos de este estudio resaltan la importancia del diseño adecuado de los sistemas de blindaje en líneas de transmisión aéreas, especialmente considerando la variabilidad en la ubicación geográfica y las condiciones climáticas. Además, se evidenció que la implementación de cables de guarda bien ubicados, como sugiere el MEG, ofrece una protección óptima contra las descargas atmosféricas, minimizando el riesgo de fallas y mejorando la fiabilidad del sistema eléctrico.

Este trabajo contribuye al diseño eficiente de blindajes para líneas de transmisión de alta tensión, ofreciendo una herramienta basada en el modelo electrogeométrico que puede ser aplicada en diferentes configuraciones y condiciones de operación.

CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: **LCV**; Metodología: **JLAM** y **LCV**; Investigación: **JSJ**; Redacción y preparación del borrador original: **JLAM**; Redacción, revisión y edición: **JSJ**; Supervisión: **LCV**; Análisis formal: **JLAM**; Administración del proyecto: **LCV**.

Financiamiento: Los autores declaran no haber recibido financiación externa.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos se encuentran en el artículo.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] C. Tort, S. Şahin, O. Hasançebi. "Optimum design of steel lattice transmission line towers using simulated annealing and PLS-TOWER," *Computers & Structures*, vol. 179, pp. 75-94, Jan. 2017, available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.10.017>
- [2] H. Xue, M. Popov. "Analysis of switching transient overvoltages in the power system of floating production storage and offloading vessel," *Electric power systems research*, vol. 115, pp. 3-10. Oct. 2014, available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2014.01.021>
- [3] S. Hosseini, M. Mirzaie, T. Barforoshi, "Impact of surge arrester number and placement on reliability and lightning overvoltage level in high voltage substations," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 65, pp. 146-158. Feb. 2015, available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.09.037>
- [4] R. Shariatinasab, J. Gholinezhad. "The effect of grounding system modeling on lightning-related studies of transmission lines," *Journal of applied research and technology*, vol. 15 no. 6, pp. 545-554. Dec. 2017, available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jart.2017.06.003>
- [5] B. Franc, B. Filipović-Grčić, V. Milardić. "Lightning overvoltage performance of 110 kV air-insulated substation," *Electric Power Systems Research*, vol. 138, pp. 78-84. Sep. 2016, available: <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.12.002>
- [6] Z. Yu, T. Zhu, Z. Wang, G. Lu, R. Zeng, Y. Liu, C. Zhuang. "Calculation and experiment of induced lightning overvoltage on power distribution line," *Electric Power Systems Research*, vol. 139, pp. 52-59. Oct. 2016, available: <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.12.039>
- [7] N. Othman, M. Rohani, W. Mustafa, C. Woi, A. Rosmi, N. Shakur, A. Shahriman. "An overview on overvoltage phenomena in power systems," In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 557, no. 1, pp. 1-5. Jun. 2019, available: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/557/1/012013>
- [8] M. Trainba, C. Christodoulou, V. Vita, L. Ekonomou. "Lightning overvoltage and protection of power substations," *WSEAS Transactions on Power Systems*, vol. 12, pp. 107-114. 2017, available: <https://wseas.com/journals/ps/2017/a245816-080.pdf>
- [9] R. Rodrigues, V. Mendes, J. Catalão. "Protection of interconnected wind turbines against lightning effects: Overvoltages and electromagnetic transients study," *Renewable energy*, vol. 46, pp. 232-240. Oct. 2012, available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.016>
- [10] J. Li, *Measurement and analysis of overvoltages in power systems*. John Wiley & Sons Singapore Pte Ltd, 2018, available: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=fZINDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP2&dq=Overvoltages+of+atmospheric+origin&ots=qxNJdwDLTx&sig=jALqX2WvCgKaWDZiMxAuepldz3o#v=onepage&q=Overvoltages%20of%20atmospheric%20origin&f=false>
- [11] S. Bjelić, N. Marković, Z. Bogičević, I. Bjelić. "Application of Cauchy (Lipschitz) Criterion for Obtaining Theoretical Models of Atmosphere Striking Overvoltages". *Information Technology and Computer Science*, vol. 9, pp. 20-30, Sep. 2019, available: <http://dx.doi.org/10.5815/ijitcs.2019.09.03>
- [12] P. F. Salazar, "Diseño óptimo de apantallamiento de líneas de transmisión de alto voltaje y extra alto voltaje," in 2019 XXVI *Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica-EPN, Quito*. 2013, pp.12-18.
- [13] Tort, C., Şahin, S., & Hasançebi, O. (2017). Optimum design of steel lattice transmission line towers using simulated annealing and PLS-TOWER. *Computers & Structures*, 179, 75-94. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.10.017>
- [14] Xue, H., & Popov, M. (2014). Analysis of switching transient overvoltages in the power system of floating production storage and offloading vessel. *Electric Power Systems Research*, 115, 3-10. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.01.021>
- [15] Shariatinasab, R., & Gholinezhad, J. (2017). The effect of grounding system modeling on lightning-related studies of transmission lines. *Journal of Applied Research and Technology*, 15(6), 545-554. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.06.003>

- [16] Franc, B., Filipović-Grčić, B., & Milardić, V. (2016). Lightning overvoltage performance of 110 kV air-insulated substation. *Electric Power Systems Research*, 138, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2015.12.002>
- [17] Yu, Z., Zhu, T., Wang, Z., Lu, G., Zeng, R., Liu, Y., & Zhuang, C. (2016). Calculation and experiment of induced lightning overvoltage on power distribution line. *Electric Power Systems Research*, 139, 52-59. <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2015.12.039>
- [18] Salazar, P. F. (2013). Diseño óptimo de apantallamiento de líneas de transmisión de alto voltaje y extra alto voltaje. XXVI *Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica-EPN, Quito*.
- [19] Shafaei, A., Gholami, A., & Shariatinasab, R. (2012). Probabilistic evaluation of lightning performance of overhead transmission lines considering non-vertical strokes. *Scientia Iranica*, 19(3), 812-819. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.06.014>
- [20] Rodrigues, R., Mendes, V., & Catalão, J. (2012). Protection of interconnected wind turbines against lightning effects: Overvoltages and electromagnetic transients study. *Renewable Energy*, 46, 232-240. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.016>
- [21] Li, J. (2018). *Measurement and analysis of overvoltages in power systems*. John Wiley & Sons Singapore Pte Ltd.
- [22] Bjelić, S., Marković, N., Bogičević, Z., & Bjelić, I. (2019). Application of Cauchy (Lipschitz) Criterion for Obtaining Theoretical Models of Atmosphere Striking Overvoltages. *Information Technology and Computer Science*, 9, 20-30. <https://doi.org/10.5815/ijitcs.2019.09.03>
- [23] IEEE Std. 1410, *Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*, 2004.
- [24] A. Shafaei, A. Gholami, R. Shariatinasab. "Probabilistic evaluation of lightning performance of overhead transmission lines considering non-vertical strokes," *Scientia Iranica*, vol. 19 no. 3, pp. 812-819. Jun. 2012, available: <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.06.014>
- [25] Liu, L., Zhang, G., Zhu, Z., Wang, H., & Ma, Z. (2006). Atmospheric continuous filament discharge plasma (ACFDP) applied to crop sterilization. In *The 33rd IEEE International Conference on Plasma Science, 2006. ICOPS 2006. IEEE Conference Record-Abstracts* (pp. 187-189). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PLASMA.2006.370654>