

Atenuación de perfiles de radiointerferencia por corona en líneas de transmisión aplicando optimización escalar

Carlos Tejada-Martínez¹

Pablo Gómez-Zamorano²

Fermín P. Espino-Cortés²

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica,

²Departamento de Ingeniería Eléctrica, SEPI.

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco,
Instituto Politécnico Nacional.

Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos', Col. Lindavista,

CP 07738, México, DF.

MÉXICO.

Tel. Fax (+52) 55 5729 6000 ext. 54844

Correo electrónico ctejadam303@yahoo.com.mx

pgomezz@ipn.mx

fespinoc@ipn.mx

Recibido el 25 de septiembre de 2009; aceptado el 18 de febrero de 2010.

1. Resumen

En este trabajo se analizan algunas técnicas computacionales de atenuación de perfiles de radiointerferencia (RI) debida a líneas de transmisión de alta tensión con corona. Se presenta un caso de estudio en una línea trifásica de 400 kV, donde se calculan los perfiles de RI y la distribución del campo eléctrico en la superficie de los conductores. Finalmente, con el propósito de minimizar los perfiles de RI, se aplica optimización escalar para seleccionar los valores óptimos de tres variables: número de conductores por fase, radios y espaciamiento entre subconductores.

Palabras clave: efecto corona, optimización escalar, radiointerferencia (RI).

2. Abstract (Attenuation of Radiointerference Profiles Due to Corona in Transmission Lines Applying Scalar Optimization)

In this paper, computational techniques for attenuating radiointerference (RI) profiles due to high voltage transmission

lines with corona are analyzed. A test case on a 400 kV transmission line is presented, where RI profiles and electric field distribution around conductors are computed. Finally, in order to attenuate RI profiles, scalar optimization is applied to select the optimal values for three variables: number of conductors, spacing and radius.

Key words: corona, radiointerference, scalar optimization.

3. Introducción

El efecto corona se presenta cuando el potencial de un conductor es lo suficientemente elevado para originar una intensidad de campo eléctrico igual o superior a la rigidez dieléctrica del medio gaseoso que lo circunda. Algunos de los fenómenos ocasionados por corona son: distorsión en la propagación de ondas, ruido audible y radiointerferencia (RI) [1, 2].

En este trabajo se analizan algunas técnicas para la atenuación de perfiles de RI generados por líneas de transmisión multiconductoras con efecto corona. Para el cálculo de perfiles de RI se utiliza un método basado en el propuesto por Gary [3-5], incluyendo mejoras en la precisión del cálculo de parámetros obteniéndose una mayor exactitud en las predicciones de perfiles de RI [6]. También se analiza la distribución del campo eléctrico en diferentes arreglos de conductores utilizando una herramienta de modelado de fenómenos físicos mediante la aplicación de elemento finito (COMSOL Multiphysics®) [7,8]. A fin de minimizar los perfiles de RI, se aplica optimización escalar utilizando la función *fminbnd* de MATLAB para seleccionar los valores óptimos de tres variables: número de conductores por fase, radios y espaciamiento entre subconductores.

4. Desarrollo

4.1. Radiointerferencia (RI) por corona

Cada descarga corona presente a lo largo de los conductores de una línea de transmisión, se comporta como una fuente de corriente, la cual inyecta un tren de pulsos de naturaleza aleatoria al conductor. Cada pulso de corriente inyectado se divide a su vez en dos pulsos con la mitad de la amplitud del pulso original, viajando en direcciones opuestas a lo largo

del conductor. Los pulsos van distorsionándose y atenuándose hasta que se vuelven insignificantes a una cierta distancia del punto de origen. De esta manera, en cualquier punto de la línea, la corriente circulante resultante está formada por los pulsos producidos por las fuentes distribuidas a lo largo del conductor. Además, una fuente de corona en uno de los conductores de una línea multiconductora induce pulsos de corriente en los demás conductores [1,9].

El concepto de *función de excitación* (Γ) propuesto por Gary considera la naturaleza aleatoria y pulsante de las corrientes corona [3-5]. Varios grupos de investigación han derivado fórmulas empíricas para Γ , basadas en datos experimentales obtenidos en estudios desarrollados bajo condiciones de lluvia densa (1 a 20 mm/hr) [10]. En la tabla 1 se presentan algunas de estas fórmulas, dadas en dB sobre $1 \mu\text{A}/\text{m}^{1/2}$, a una frecuencia de 500 kHz y sobre el nivel de mar. En la tabla, d es el diámetro del conductor en cm y g_m es el gradiente máximo en kV/cm [6].

4.2. 5. Método de cálculo de perfiles de RI

El método requiere la determinación de las corrientes y voltajes en diferentes puntos a lo largo de la línea relacionados con la generación de corona en los conductores, para posteriormente calcular los campos eléctricos y magnéticos en la vecindad de la línea [6].

Se considera una línea de transmisión multiconductora de longitud infinita con inyección de corriente por efecto corona distribuida uniformemente por unidad de longitud y denotada por \mathbf{J} . Para una longitud elemental de la línea puede emplearse el circuito de la Fig. 1, a partir del cual se obtienen las ecuaciones del telegrafista de la línea:

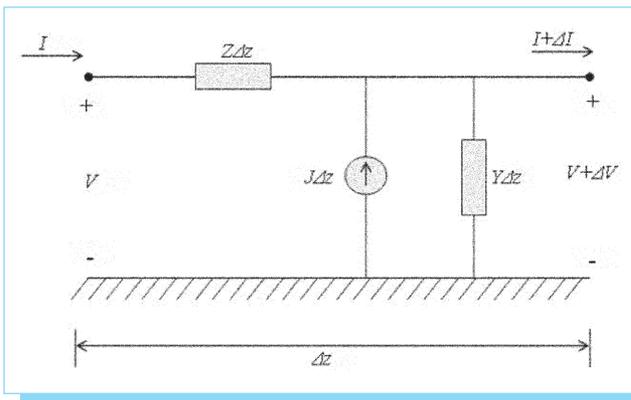


Fig. 1. Circuito por unidad de longitud de una línea aérea con inyecciones de corriente corona.

Tabla 1. Fórmulas empíricas para el cálculo de la función de excitación.

CIGRÉ (lluvia densa)	$\Gamma = -40.69 + 3.5g_m + 6d$
BPA (ambiente desfavorable, estable)	$\Gamma = 37.02 + 120 \log \frac{g_m}{15} + 40 \log \frac{d}{4}$
IREQ (lluvia densa)	$\Gamma = -93.03 + 92.42 \log (g_m) + 43.02 \log (d)$
EPRI (lluvia densa)	$\Gamma = 76.62 - \frac{580}{g_m} + 38 \log \frac{d}{3.8}$

$$-\frac{d\mathbf{V}}{dz} = \mathbf{Z}\mathbf{I} \quad (1)$$

$$-\frac{d\mathbf{I}}{dz} = \mathbf{Y}\mathbf{V} - \mathbf{J} \quad (2)$$

Los parámetros \mathbf{Z} y \mathbf{Y} son la impedancia serie y la admitancia en derivación por unidad de longitud de la línea, calculados a la misma frecuencia [6, 11, 12]. A fin de desacoplar el sistema trifásico, se aplica análisis modal para obtener las constantes de atenuación y corrientes en el dominio de modos:

$$\lambda_v = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{Y}\mathbf{M} \quad (3)$$

$$\lambda_i = \mathbf{N}^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{Z}\mathbf{N} \quad (4)$$

λ_v y \mathbf{M} son las matrices de valores propios (diagonal) y vectores propios del producto $\mathbf{Z}\mathbf{Y}$. De igual forma, λ_i y \mathbf{N} son las matrices de valores propios (diagonal) y vectores propios del producto $\mathbf{Y}\mathbf{Z}$. Las matrices de constantes de propagación modal Ψ y constantes de atenuación modal α_m se calculan de la siguiente forma:

$$\Psi = \sqrt{\lambda} \quad (5)$$

$$\alpha_m = \text{Re}\{\Psi\} \quad (6)$$

El vector de corrientes de inyección de corona se obtiene:

$$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{C}}{2\pi\epsilon_0} \Gamma \quad (7)$$

donde \mathbf{C} es la matriz de capacitancias de la línea. En el dominio modal se tiene:

$$\mathbf{J}_m = \mathbf{N}^{-1}\mathbf{J} \quad (8)$$

Empleando (6) y (8), los componentes modales de corriente en los conductores se calculan como:

$$\mathbf{I}_m = \begin{bmatrix} \frac{J_{m1}}{2\sqrt{\alpha_{m1}}} \\ \frac{J_{m2}}{2\sqrt{\alpha_{m2}}} \\ \vdots \\ \frac{J_{mm}}{2\sqrt{\alpha_{mm}}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

donde $J_{m1}, J_{m2}, \dots, J_{mm}$ son los elementos del vector \mathbf{J}_m , mientras que $\alpha_{m1}, \alpha_{m2}, \dots, \alpha_{mm}$ son las constantes de atenuación modales. El flujo de corriente en todos los conductores debido a cada uno de los modos es:

$$\mathbf{I} = \mathbf{N} \text{diag}(\mathbf{I}_m) \quad (10)$$

donde $\text{diag}(\mathbf{I}_m)$ es una matriz diagonal formada por los elementos del vector \mathbf{I}_m . \mathbf{I} es entonces una matriz de $n \times n$, con sus renglones representando los conductores de la línea y sus columnas representando los modos. El campo magnético a una distancia horizontal x de la línea (a nivel del terreno) debido al k -ésimo modo se calcula como:

$$H_{x,k} = \sum_{i=1}^n \frac{I_{i,k}}{2\pi} \left[\frac{h_i}{h_j^2 + (x_i - x)^2} + \frac{h_i + 2P}{(h_i + 2P)^2 + (x_i - x)^2} \right] \quad (11)$$

donde

$I_{i,k}$ = elemento del i -ésimo renglón y k -ésima columna de la matriz \mathbf{I}

h_i = altura del i -ésimo conductor

x_i = distancia del i -ésimo conductor

x = punto de medición

P = profundidad de penetración compleja para el retorno por tierra, definido como:

$$P = \sqrt{\frac{\rho_e}{j\omega\mu_e}} \quad (12)$$

donde ρ_e y μ_e son la resistividad y permeabilidad del terreno, respectivamente. La componente vertical correspondiente de campo eléctrico, asumiendo un modo de propagación cuasi-TEM (cuasi-transversal electromagnético) es:

$$E_{y,k} = Z_0 H_{x,k} \quad (13)$$

donde Z_0 es la impedancia de onda en espacio libre:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 120\pi \quad (14)$$

Después de determinar la componente de campo eléctrico debida a cada modo, el campo eléctrico total debido a todos los modos se calcula mediante una suma *rms*:

$$E_{y,total} = \sum_{k=1}^n |E_{y,k}|^2 \quad (15)$$

El campo eléctrico debido a corona, $E_{y,total}$, suele expresarse en dB sobre $1 \mu\text{V}/\text{m}$, de la siguiente forma:

$$E_{y,total} \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \frac{E_{y,total} \text{ (\mu V/m)}}{1 \mu\text{V/m}} \quad (16)$$

Como una línea trifásica genera tres campos de interferencia desplazados en el tiempo, en los instrumentos de medición de RI se aplica el criterio establecido por el CISPR [13], el cual indica que si uno de los campos es más alto que los demás por más de 3dB, el instrumento de medición sólo toma en cuenta dicho campo. De lo contrario, se toman los dos campos más altos y se aplica la ecuación:

$$E_{(CISPR)} = \frac{E_1 + E_2}{2} + 1.5\text{dB} \quad (17)$$

4.3. Distribución del campo eléctrico en la superficie de conductores

Al buscar minimizar los perfiles de RI de una línea de transmisión, es necesario reducir la intensidad del campo eléctrico en la superficie de los conductores, aumentando el radio de los mismos o el radio equivalente del haz, lo cual a su vez se puede alcanzar variando el espaciamiento entre subconductores, y también aumentando el número y radio de conductores por fase [2].

Utilizando una herramienta de modelado de fenómenos físicos mediante la aplicación de elemento finito (COMSOL Multiphysics®), se calculó la intensidad de campo eléctrico en el área circundante de tres arreglos con 1, 2 y 4 conductores por haz energizados con 400 kV [7,8].

Partiendo del centro del conductor o del haz de conductores, se trazó una línea de evaluación sobre la cual se calculó la intensidad de campo eléctrico. Para el caso de un solo conductor, las líneas equipotenciales en el área circundante se muestran en la Fig. 2, y en la Fig. 3 se presenta la curva obtenida observando que la mayor intensidad de campo eléctrico se encuentra en la superficie del conductor, con un valor cercano a 14 kV/cm.

Las simulaciones para un haz de dos y otro de cuatro conductores se realizaron mediante el mismo análisis que en el

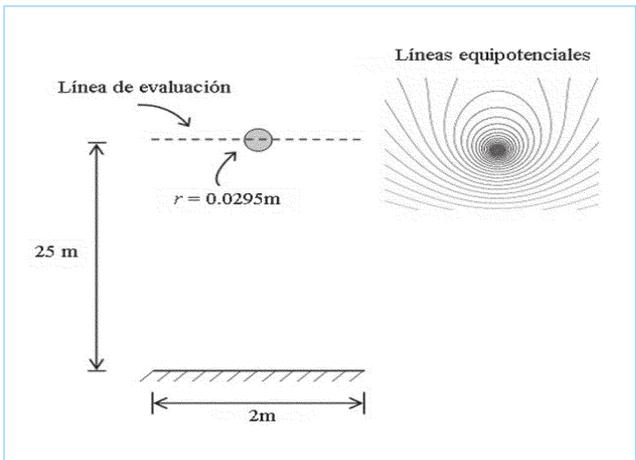


Fig. 2. Líneas equipotenciales alrededor de un solo conductor energizado con 400 kV.

caso anterior. Las características de las configuraciones y la distribución de las líneas equipotenciales se muestran en las figuras 4 y 6. En la Fig. 5 se presenta la curva obtenida para un haz de dos conductores, observando que la mayor intensidad de campo eléctrico se encuentra en la superficie externa del haz de conductores, con un valor de alrededor de 15 kV/cm, aun cuando el radio de los subconductores es considerablemente menor que en el caso anterior de un conductor único. En la Fig. 7 se observa la curva obtenida para un haz de cuatro conductores; en este caso la intensidad de campo eléctrico máxima en la superficie externa del haz es de alrededor de 12 kV/cm, aunque se utilizaron conductores de menor radio que en el haz de dos conductores.

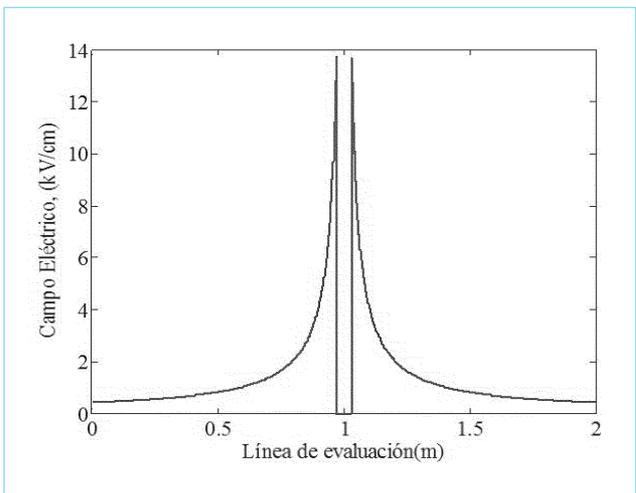


Fig. 3. Intensidad de campo eléctrico en un conductor.

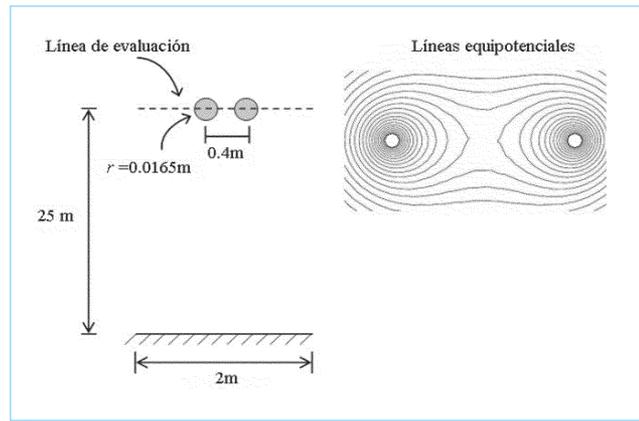


Fig. 4. Líneas equipotenciales alrededor de un haz de dos conductores energizados con 400 kV.

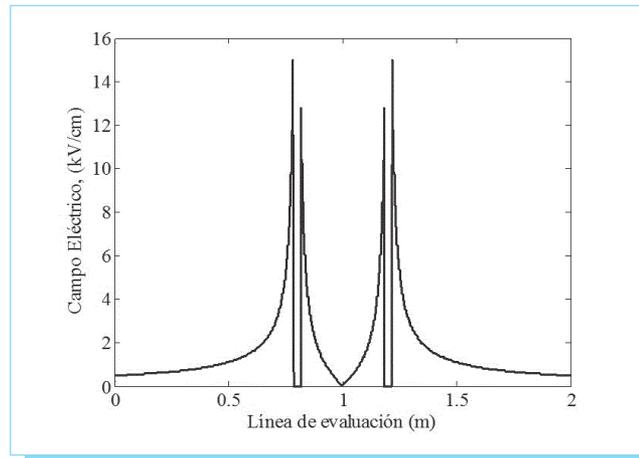


Fig. 5. Intensidad de campo eléctrico en un haz de dos conductores.

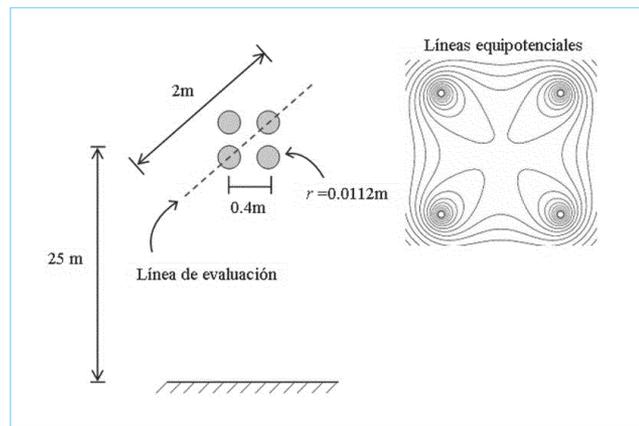


Fig. 6. Líneas equipotenciales alrededor de un haz de cuatro conductores energizados con 400 kV.

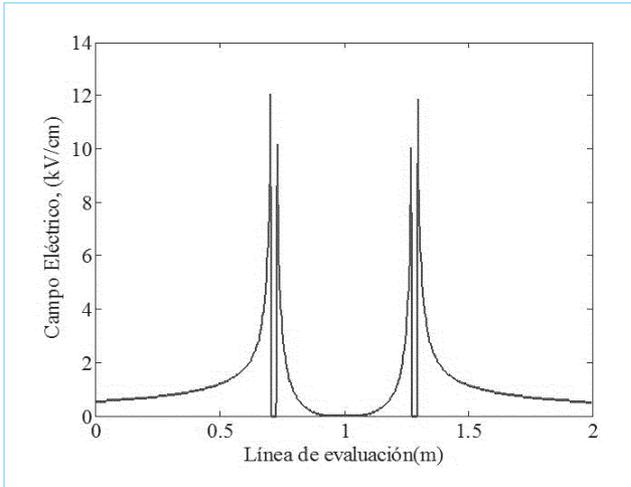


Fig. 7. Intensidad de campo eléctrico en un haz de cuatro conductores.

4.4. Optimización escalar por el método de la búsqueda de la sección dorada

La optimización escalar consiste en encontrar el mínimo o el máximo de una función de una sola variable. Se comienza definiendo un intervalo de búsqueda con límites inferior (x_l) y superior (x_u), y posteriormente se seleccionan dos puntos intermedios del intervalo, bajo las siguientes condiciones:

$$l_0 = l_1 + l_2 \tag{18}$$

$$\frac{l_1}{l_0} = \frac{l_2}{l_1} \tag{19}$$

Sustituyendo (18) en (19) se tiene:

$$\frac{l_1}{l_1 + l_2} = \frac{l_2}{l_1} \tag{20}$$

Tomando el recíproco y sustituyendo $R=l_2/l_1$ se tiene:

$$1 + R = \frac{1}{R} \tag{21}$$

$$R^2 + R - 1 = 0 \tag{22}$$

De donde se obtiene la raíz positiva $R=0.6180$, valor conocido como la razón dorada, el cual es el elemento clave de este método [15]. De esta forma, los puntos interiores x_1 y x_2 se calculan con:

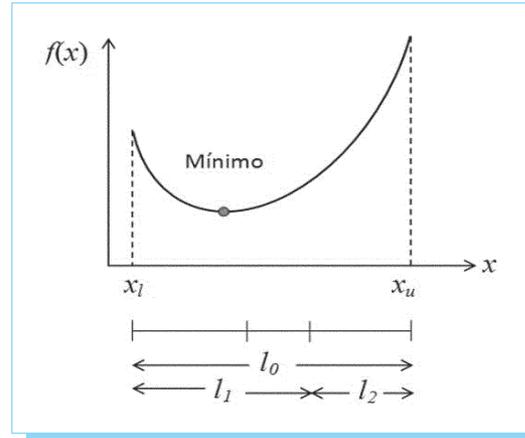


Fig. 8. Condiciones para la selección de puntos interiores.

$$d = 0.6180 * (x_u - x_l) \tag{23}$$

$$x_1 = x_l + d \tag{24}$$

$$x_2 = x_u - d \tag{25}$$

La función se evalúa en estos dos puntos interiores y se pueden presentar dos casos:

1. Si, como es el caso de la Fig. 9, $f(x_1) > f(x_2)$, entonces el dominio de x a la derecha de x_1 (de x_1 a x_u) se puede eliminar ya que no contiene el mínimo. En este caso x_1 será el nuevo x_u en la siguiente iteración.
2. Si $f(x_2) > f(x_1)$, entonces el dominio de x a la izquierda de x_2 (de x_l a x_2) se puede eliminar ya que no contiene el mínimo. En este caso x_2 será el nuevo x_l en la siguiente iteración.

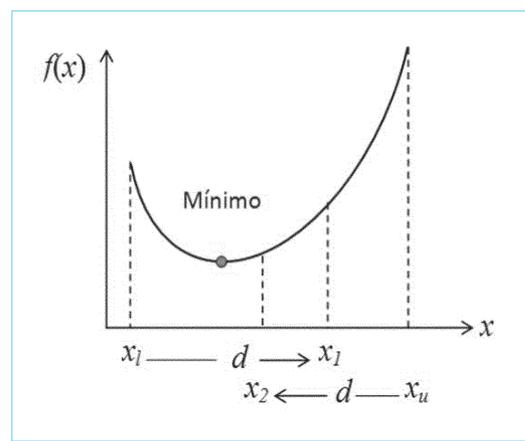


Fig. 9. Puntos interiores de acuerdo a la sección dorada.

El siguiente paso implica definir un nuevo intervalo que incluya el valor óptimo. En cada iteración el intervalo se reduce en un factor de la razón dorada (aproximadamente 61.8%) [14,15].

4.5. Caso de aplicación y análisis de resultados

Se analiza una línea de transmisión trifásica de 400 kV, formada por dos conductores por fase con un radio de cada subconductor de 0.016 m. La configuración geométrica se muestra en la Fig. 10.

Se calcula el perfil de RI en dB sobre $1\mu\text{V/m}$, en un rango de distancias de 0 a 150 m, sobre el nivel de suelo. Los cálculos son realizados a una frecuencia de 500 kHz. Se simuló la aparición de corona en cada una de las fases por separado utilizando como función de excitación la segunda fórmula de la tabla I. Para obtener el nivel de RI total que mediría un instrumento de medición que considera valores cuasi-pico (CP), se aplicó la ecuación (17).

Los resultados de la simulación se presentan en la Fig. 11, en donde se observa que inicialmente se tiene un nivel de RI de 63 dB. Sin embargo, conforme aumenta la distancia lateral el nivel de RI disminuye.

A fin de atenuar los perfiles de RI de la línea, se utilizó la función *fminbnd* de MATLAB, basada en el método de búsqueda de la sección dorada, para aplicar optimización escalar con tres variables: espaciamento entre subconductores,

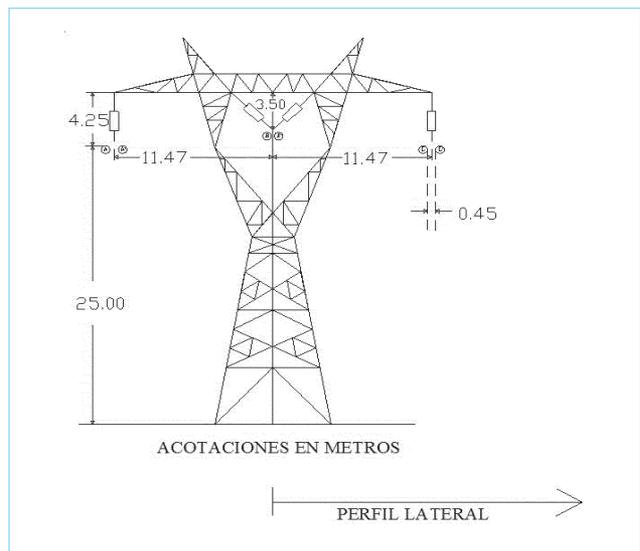


Fig. 10. Geometría de una línea trifásica de 400 kV.

Tabla 2. Valores óptimos encontrados aplicando optimización escalar.

Espaciamento entre subconductores (m)		Número de conductores de haz		Radio de subconductores (m)	
Intervalo de búsqueda	Valor óptimo	Intervalo de búsqueda	Valor óptimo	Intervalo de búsqueda	Valor óptimo
0.1-1.0	0.2677	1-4	4	0.0112 - 0.0295	0.0294

número de conductores por fase y radio de subconductores. Los intervalos de búsqueda del mínimo y valores óptimos encontrados para cada variable, se presentan en la tabla 2.

Utilizando los valores encontrados, espaciamento de 0.2677 m y cuatro conductores por fase ($n = 4$) de 0.0294 m de radio, se calcula el perfil de RI observándose en la Fig. 11 que la reducción con respecto al perfil calculado inicialmente, es de 28 dB. Utilizando los mismos valores de espaciamento y radio, pero con sólo dos conductores por fase ($n = 2$), la reducción del perfil de RI es de 11 dB.

5. Conclusiones

En este trabajo se analizaron los niveles de RI que genera una línea de transmisión de 400 kV con corona. Se buscó minimizar la intensidad de campo eléctrico en la superficie

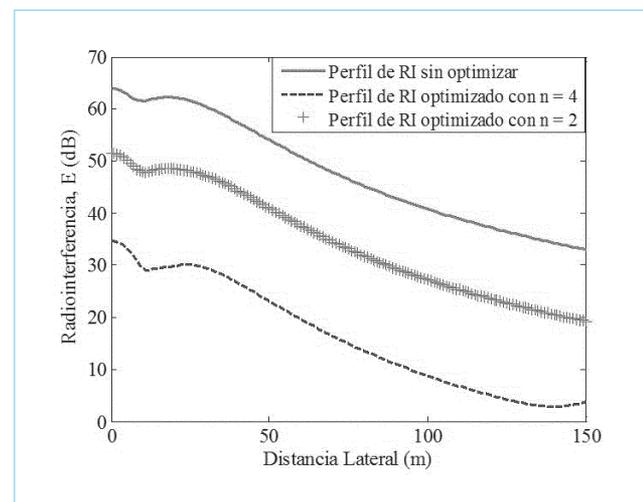


Fig. 11. Perfil de RI total de una línea trifásica de 400 kV.

de los conductores aumentando el radio equivalente, mediante la variación del número de conductores por fase, espaciamento entre subconductores y su radio. Se aplicó optimización escalar utilizando la función *fminbnd* de MATLAB, determinando los valores óptimos de espaciamento, número de subconductores por haz y radios para minimizar los perfiles de RI. Se observó que entre mayor sea el radio y número de conductores por haz, se tienen menores niveles de RI, sin embargo el espaciamento entre subconductores debe seleccionarse adecuadamente ya que distancias muy grandes incrementan los perfiles de RI.

6. Referencias

- [1] P. Sarma Maruvada, *Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines*, Research Studies Press Ltd., England 2000.
- [2] L. A. Siegert, *Alta tensión y sistemas de transmisión*. Editorial Limusa, 1988.
- [3] Marcel R. Moreau, Claude H. Gary, 'Predetermination of the Radio-Interference Level of High Voltage Transmission Lines. I - Predetermination of the Excitation Function', *IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing*, Portland, Ore., July 18 -23, 1971.
- [4] Marcel R. Moreau, Claude H. Gary. 'Predetermination of the Radio-Interference Level of High Voltage Transmission Lines. II - Field Calculating Method', *IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing, Portland, Ore.*, July 18 -23, 1971.
- [5] Claude H. Gary, 'The Theory of the Excitation Function: A Demonstration of its Physical Meaning', *IEEE Winter Power Meeting*, New York, N.Y., January 31 -February 5, 1971.
- [6] C. Tejada, P. Gómez, J. C. Escamilla, 'Computation of Radio Interference Levels in High Voltage Transmission Lines with Corona', *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 7, Issue 1, March 2009.
- [7] *COMSOL User's Guide and Introduction*. COMSOL AB, 2005.
- [8] *COMSOL Reference Manual*. COMSOL AB, 2005.
- [9] *Project UHV, Transmission Line Reference Book 345 kV and Above*, Second Edition, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1982.
- [10] Robert G Olsen, Steven D. Scheum, Vernon, 'Comparison of Several Methods for Calculating Power Line Electromagnetic Interference Levels and Calibration with Long Term Data', *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 2, pp. 903 - 913. April 1992.
- [11] C. Gary, 'Approche complète de la propagation multifilaire en haute fréquence par utilisation des matrices complexe', *EDF Bull. Direction des Études et Rech.*, no. 3/4, pp. 5-20, 1976.
- [12] C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, Ed. John Wiley & Sons, New York 1994.
- [13] *CISPR Publication No. 1*, 'Specifications for CISPR Radio Interference Measuring Apparatus for the Frequency Range 0.15 to 30 MHz'.
- [14] G E. Forsythe, M. A. Malcolm, C. B. Moler, *Computer Methods for Mathematical Computations*, Prentice-Hall, 1976.
- [15] Steven C. Chapra, *Métodos numéricos para ingenieros*, McGraw Hill, 2003.

Periódica

Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias

<http://www.dgbiblio.unam.mx/>
http://132.248.9.1:8991/F/-/?func=find-b-0&local_base=PER01