

EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS ELECTROMAGNÉTICOS DE LA LÍNEA DE ± 500 KV PROYECTO HIDRO AYSÉN DE CHILE

Luis Ortiz N. y Emilio Aranda B.
Universidad de Santiago de Chile
luis.ortiz@usach.cl, teléfono 56-2-27183336

Resumen. En este trabajo se realiza un estudio y análisis de los efectos ambientales, producidos por los fenómenos electromagnéticos que generan las líneas aéreas bipolares de transmisión de corriente continua de alta tensión (CCAT). Se entregan metodologías de cálculo para evaluar el Ruido Audible y Interferencia de Radio producidas por el Efecto Corona, el Campo Eléctrico y Magnético,.

Se desarrolla un programa computacional que incluye los métodos de cálculos presentados en este trabajo.

Palabras claves

Transmisión de electricidad, Líneas de transmisión, HVDC Corriente Continua en Alta Tensión, Campos electromagnéticos, Software.

1. Introducción

En Chile la tasa de demanda de energía eléctrica está creciendo a un ritmo acelerado, lo que implica duplicar la producción de electricidad cada 15 años aproximadamente, por lo cual, se hace imperiosa la necesidad de construir nuevas centrales eléctricas que abastezcan esta demanda. Es así, que aparece sumamente atractivo el potencial hidroeléctrico de la región de Aysén, estimado de 8.000 MW.

En la región de Aysén está en la etapa de Evaluación de Impacto Ambiental dos proyectos Hidro Aysén de 2800 MW y Energía Austral de 1200 MW. Entonces, considerando la gran cantidad de potencia a transmitir y la distancia entre generación y consumo (2.000 Km.), el sistema de transmisión adquiere una importancia relevante. Bajo este escenario, la transmisión en corriente continua de alta tensión aparece sumamente atractiva, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

En Chile serían las primeras líneas de CCAT (Corriente Continua de Alta Tensión), y serán unas de las más largas del mundo. Es necesario estudiar los efectos electro-magnéticos que generan estas líneas. Estos efectos son: interferencias de radio, ruido audible, campo eléctrico y campo magnético. Estos efectos están relacionados con los parámetros de diseño de la línea, tales como el número de conductores y su diámetro.

El objetivo general de este trabajo es estudiar los efectos electromagnéticos que generan las líneas de transmisión de CCAT y su impacto al medio ambiente. El estudio considera un análisis y selección de los métodos de cálculo para las interferencias de radio, ruido audible, campo eléctrico y campo magnético. Para realizar el estudio se desarrolla un programa computacional de fácil uso.

El programa será aplicado a la línea de ± 500 kV del proyecto Hydro Aysén de Chile de 2800 MW y 2000 Km de longitud.

La línea de CCAT tiene un tramo de 160 Km submarino. En este trabajo será considerado el tramo aéreo el tramo submarino será comentado. Se considerará la operación normal bipolar.

Para evaluar las interferencias electro-magnéticas y el ruido audible producido por el efecto corona, es necesario conocer el campo eléctrico en la superficie de los conductores. El método utilizado es analítico y es expuesto en [1,2].

2. Interferencias de radio

Una de las consecuencias del Efecto Corona en una línea de transmisión son las interferencias electromagnéticas (EMI). Las EMI tienen un amplio rango de frecuencias, siendo divididas en interferencias de radio (RI), de 3 kHz a 30 MHz, e interferencias de televisión (TVI), de 30 MHz a 1 GHz.

La radio interferencia corresponde a cualquier perturbación indeseada dentro de la banda de radio frecuencia. En las líneas de transmisión prestan principal cuidado las interferencias en la banda de transmisión de radio difusión en amplitud modulada AM (535-1605 kHz). Las interferencias en la banda FM (entre 87 y 108 MHz) son de poca magnitud, siendo generalmente despreciadas [6]. Sin embargo, también podría verse afectado cualquier sistema de comunicación entre las bandas AM y FM.

Las líneas CCAT en teoría podrían generar interferencias de televisión, pero las mediciones han mostrado una magnitud tan baja, que no concibe mayor preocupación. En conclusión, las líneas CCAT no son fuente de interferencias de televisión [6].

Basándose en datos obtenidos de líneas experimentales y reales, la BPA (EE.UU) desarrolló una fórmula empírica para predecir la RI (medida con un instrumento CISPR QP) de una línea bipolar CC. La RI promedio para buen tiempo, está dada por [2]:

$$RI = 51,7 + 86 \log\left(\frac{g}{25,6}\right) + 40 \log\left(\frac{d}{4,62}\right) + 10\left\{1 - [\log(10f)]^2\right\} + 40 \log\left(\frac{19,9}{D}\right) + \frac{q}{300} \quad (1)$$

donde:

RI, es la radio interferencia, dB ($1 \mu V/m$).

g, es el gradiente máximo del haz de conductores (polo positivo), kV/m.

d, es el diámetro del conductor, cm.

f, es la frecuencia de la interferencia, MHz.

D, es la distancia radial entre el polo positivo y el punto de cálculo, m.

q, es la altitud, m (msnm).

Dado que la altura de los conductores influye en la RI. Es frecuente utilizar la altura promedio de los conductores (altura mínima más un tercio de la flecha) para estimar la RI de la línea. Sin embargo, en algunos casos es utilizada la altura mínima, con propósitos conservadores de diseño; o bien, para comparar valores de cálculos con mediciones hechas en el medio del vano entre dos torres (donde comúnmente se da la altura mínima).

Actualmente, no existe información estadística adecuada para determinar la diferencia entre los valores de RI entre buen tiempo y mal tiempo; o entre los valores máximo y promedio, en buen tiempo. Sin embargo, ocupando mediciones hechas en un largo periodo de tiempo, el valor máximo de RI en buen tiempo (95% probabilidad de no ser excedido) puede ser obtenido sumando 6 dB al valor promedio en buen tiempo. Y para estimar la RI promedio en mal tiempo, se restan 5 dB al valor promedio en buen tiempo [2].

3. Ruido audible

Producto de las descargas corona, las líneas de transmisión son una fuente de contaminación acústica o ruido audible (RA), que con el transcurso del tiempo ha ido adquiriendo gran relevancia, resultando en un importante factor de diseño de una línea de transmisión eléctrica. Comparativamente, el RA para líneas de CC es uno de los factores de diseño que más encarece las líneas [1,3].

En una línea bipolar de CCAT, la principal fuente de ruido audible RA es el polo positivo. La contribución del polo negativo al RA de la línea es mínima, por lo que es despreciada. Este hecho se debe

principalmente a que las descargas corona positivas generan pulsos de mayor amplitud [1,5].

En general, los métodos para predecir el RA de las líneas de CC, son similares a los que existen para CA. Con la excepción, de que sólo el o los polos positivos se consideran como fuente de RA, al contrario de los sistemas CA donde son consideradas todas las fases de la línea.

Basados en mediciones hechas en líneas de CC de pruebas y líneas reales, y un estudio teórico del RA generado por las descargas corona, la BPA desarrolló una expresión semiempírica para el RA generado por las líneas CC. El valor L50 de RA (50% de probabilidad de ser excedido) es calculado en buen tiempo [2,3].

$$RA = RA_0 + 86 \log(g) + k \log(N) + 40 \log(d) - 11,4 \log(R) + \frac{q}{300} \quad (2)$$

donde:

RA, es el valor del ruido audible, dBA.

g, es el campo eléctrico máximo en la superficie del conductor, kV/cm.

N, es el número de subconductores del haz.

d, es el diámetro de los subconductores, cm.

R, es la distancia radial del polo positivo al punto de cálculo, m.

q, es la altitud, m.

Las constantes empíricas están dadas por:

$$k = 25,6 \text{ para } N \geq 3$$

$$k = 0 \text{ para } N < 3.$$

$$RA_0 = -106,6 \text{ para } N \geq 3$$

$$RA_0 = -93,4 \text{ para } N < 3.$$

El valor máximo de RA en buen tiempo (L90; 90% probabilidad de no ser excedido) puede ser obtenido sumando 5 dBA al valor L50 de RA en buen tiempo. Mientras que, para el valor L50 de RA en mal tiempo se restan 6 dBA al valor L50 de RA en buen tiempo [2].

4. Campo eléctrico

El comportamiento del campo eléctrico de las líneas de transmisión de CC difiere mucho del existente en las líneas de CA.

Para gradientes eléctricos superficiales bajo el gradiente crítico existe un campo electrostático de la línea CC. Sobre el gradiente crítico, los conductores positivos y negativos de la línea generan iones con la misma polaridad de su tensión. Por esto, una carga de polaridad positiva ocurre sobre el conductor positivo, y viceversa para el conductor negativo. Entre los dos polos de la línea bipolar, ocurre una mezcla de carga

espacial positiva y negativa, provocando una recombinación iónica.

La carga espacial producida por el Efecto corona en un conductor de una línea de CC, tiene el efecto de reducir el campo eléctrico en la superficie del conductor y aumentar el nivel del campo eléctrico en el suelo. El campo eléctrico resultante sobre una línea de CC, bajo el efecto corona, puede ser asumido por dos componentes: una componente de “campo electrostático”, producida por la tensión aplicada sobre la línea y por la geometría de la misma; y otra componente de “campo por cargas espaciales”, producida por la carga espacial iónica generada por el Efecto corona [4].

La carga espacial generada cerca de cada conductor es conducida por el campo eléctrico en dirección al suelo, y hacia el conductor de polaridad opuesta, resultando en una corriente de conducción iónica entre los polos y hacia el suelo [4].

Por tanto, el ambiente eléctrico de una línea de transmisión CC debe ser caracterizado en términos de tres parámetros básicos: Campo eléctrico estático, densidad de corriente iónica y densidad de carga espacial.

El procedimiento para determinar el campo eléctrico y la densidad de corriente, incluye los cálculos de: campo electrostático, gradiente superficial, campo eléctrico y densidad de corriente por corona saturada; grado de saturación (DS), y finalmente, campo eléctrico y densidad de corriente iónica con presencia de carga espacial bajo una condición ambiental (valores con 50% y 95 % de probabilidad, de no ser excedidos) [1].

El campo eléctrico libre de cargas espaciales, a nivel del suelo, puede ser evaluado por una expresión relativamente sencilla, obtenida por el método de las imágenes. El campo eléctrico en cualquier punto sobre el suelo está dado por la formula [2]:

$$E_{sc} = \frac{2H}{\ln\left(\frac{2H}{R_e\sqrt{(2H/P)^2 + 1}}\right)} \left[\frac{1}{\left(x - \frac{P}{2}\right)^2 + H^2} - \frac{1}{\left(x + \frac{P}{2}\right)^2 + H^2} \right] \quad (3)$$

donde:

V, es el voltaje (polo-tierra) aplicado sobre los conductores de la línea, comúnmente denotado como $\pm V$, kV.

H, es la altura mínima de los polos sobre el suelo, m.

P, es la distancia entre los polos, m.

R_e , es el radio equivalente dado por la Ec. (4), m.

x, es la distancia lateral del punto de evaluación desde el centro de la línea, m.

$$R_e = \sqrt[N]{NrR_h^{N-1}} \quad (4)$$

donde: N, es el número de conductores del haz, r, es el radio de cada conductor del haz, o subconductor, R_h , es el radio del haz, dado por,

$$R_h = \frac{s}{2\text{sen}(\pi/N)}$$

siendo s la distancia entre los conductores del haz.

La determinación del campo eléctrico con cargas espaciales es un problema no lineal, complejo y difícil de resolver [7]. Para configuraciones practicas, como son las líneas de transmisión, resolver el problema por medios analíticos es complicado. Por lo que se ha recurrido a procedimientos de tipo numérico. Habitualmente se ha abordado la resolución del campo eléctrico en presencia de cargas espaciales utilizando simplificaciones que permitan reducir el problema a una dimensión. La diferencia entre el campo electrostático y en presencia de cargas espaciales puede llegar a ser de 1 a 3[6].

El procedimiento para determinar el campo eléctrico y la densidad de corriente, incluye los cálculos de: campo electrostático, gradiente superficial; campo eléctrico y densidad de corriente, por corona saturada; grado de saturación (DS); y finalmente, campo eléctrico y densidad de corriente iónica, en presencia de carga espacial bajo una condición ambiental (valores con 50% y 95 % de probabilidad, de no ser excedidos) [8].

Para determinar las variables eléctricas, se deben ejecutar los siguientes pasos [8,9]:

1º) Se deben calcular los valores saturados. Las expresiones para realizar los cálculos, fueron obtenidas en base a mediciones.

Las formulas para determinar el peak (o sea, dentro de la franja de servidumbre), del campo y la densidad de corriente; están dadas por:

$$E = 1,31 \left(1 - e^{-1,7\frac{P}{H}} \right) \frac{V}{H} \quad (5)$$

$$J(+)= 1,65 \cdot 10^{-15} \left(1 - e^{-0,7\frac{P}{H}} \right) \frac{V^2}{H^3} \quad (6)$$

$$J(-) = -2,15 \cdot 10^{-15} \left(1 - e^{-0,7\frac{P}{H}} \right) \frac{V^2}{H^3} \quad (7)$$

Los signos + y -, se refieren a la emisión de los respectivos polos. Y el valor absoluto del campo saturado positivo, es igual al negativo. En cambio, para determinar las variables eléctricas saturadas, a una distancia “x” desde el centro de la línea (franja de servidumbre); se ocupan las expresiones dadas por:

$$E_s = 1,46 \left(1 - e^{-2,5 \frac{P}{H}} \right) e^{\frac{-0,7(|x|-0,5P)}{H}} \frac{V}{H} \quad (8)$$

$$J_s (+) = 1,54 \cdot 10^{-15} \left(1 - e^{\frac{P}{H}} \right) e^{\frac{-1,75(|x|-0,5P)}{H}} \quad (9)$$

$$J_s (-) = -2,0 \cdot 10^{-15} \left(1 - e^{-1,5 \frac{P}{H}} \right) e^{\frac{-1,75(|x|-0,5P)}{H}} \quad (10)$$

Las expresiones (8,9,10), son validas para:

$$1 \leq \frac{(|x|-0,5P)}{H} \leq 4$$

V, es el voltaje polo-tierra; positivo para el polo positivo, y viceversa para el negativo, Volt.

H, es la altura mínima de los polos sobre el suelo, m.

P, es la distancia entre los polos, m.

x, es la distancia lateral del punto de evaluación desde el centro de la línea, m.

E, es el campo eléctrico, V/m.

J, es la densidad de corriente, A/m².

2°) Cálculo del campo electroestático al nivel del suelo, según la expresión (3). Según sea el caso, en el punto donde se alcanza el peak, o para:

$$1 < (|x|-P/2)/H < 4.$$

3°) Cálculo del gradiente superficial, según la expresión (11). En su cálculo, se debe ocupar la altura mínima de la línea.

El gradiente eléctrico superficial máximo por el método de Markt y Mengele, sin considerar el efecto de los cables de guardia, queda dado por la siguiente expresión [2]:

$$E_{\max} = \frac{V \left[1 + \frac{r}{R_h} (N-1) \right]}{N \cdot r \cdot \ln \left(\frac{2H}{R_e \sqrt{(2H/P)^2 + 1}} \right)} \quad (11)$$

donde: V es el voltaje (polo-tierra) $\pm V$, kV.

H es la altura de los conductores, m.

N es el número de subconductores del haz.

r es el radio de los subconductores del haz, cm.

P es la distancia entre los polos, m.

R_e es el radio equivalente dado por Ec (4), m.

R_h es el radio del haz, cm

4°) Se debe calcular el grado de saturación, dado por la expresión (12). Las constantes empíricas, K y G₀, son obtenidas de la referencia [8]. Debe elegirse una probabilidad de ocurrencia que impliquen valores del tipo L50 o L95 para el campo y la densidad de corriente.

$$DS = 1 - e^{-K(G-G_0)} \quad (12)$$

donde: G, es el gradiente superficial.

K y G₀, son constantes dependientes de las condiciones ambientales.

5°) Finalmente, los valores estimados de campo eléctrico y densidad de corriente; se calculan según las expresiones (13). Estos serán del tipo L50 o L95, y bajo una condición ambiental.

A nivel del suelo, el campo eléctrico y la densidad de corriente iónica, están dados por [10]:

$$\begin{aligned} E &= E_{sc} + DS(E_s - E_{sc}) \\ J &= DS \cdot J_s \end{aligned} \quad (13)$$

donde:

E, campo eléctrico en presencia de cargas espaciales.

E_{sc}, campo electroestático.

E_s, campo eléctrico por saturación de corona.

DS, es el grado de saturación de corona.

J_s, es la densidad de corriente iónica por saturación de corona.

Comentario Final: Los valores obtenidos para el polo positivo, pueden variar a los del polo negativo. Y esto, es propio de la naturaleza de las descargas corona. En general, los perfiles de líneas reales y de prueba, son asimétricos

5. Campo magnético

A diferencia del campo eléctrico, el campo magnético es poco mencionado en la literatura, y en los ensayos experimentales prácticamente no se considera. La razón de esta escasa atención, se debe a que el campo magnético de una línea CC, es constante, no varía en el tiempo como en las líneas de corriente alterna. Al mismo tiempo, el valor del campo magnético es inversamente proporcional a la distancia desde los conductores, implicando, en valores de campo del orden del campo magnético terrestre en la franja de servidumbre [5].

Para calcular el campo magnético, en algún punto cercano a la superficie del suelo (o en el suelo), se puede aplicar la Ley de Ampere donde los polos de la línea se consideran conductores infinitos y perpendiculares al plano transversal.

$$B = \mu_0 |H| \quad (14)$$

$$|H| = \sqrt{H_+^2 + H_-^2} \quad (15)$$

$$\vec{H}_+ = \frac{I}{2\pi R_+} \quad (16)$$

$$\vec{H}_- = \frac{-I}{2\pi R_-}$$

donde B es la densidad de campo magnético en Tesla, $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ permitividad del aire, H intensidad de campo magnético en A/m, R₊ y R₋ distancias del polo positivo y polo negativo al punto de cálculo en m.

6. Desarrollo del programa de computación

El programa computacional, fue desarrollado en Excel de Microsoft Office, y en particular, utilizando la herramienta de programación “Macros” que posee Visual Basic.

El programa contempla el cálculo de las siguientes variables:

- Gradiente superficial en los subconductores: Método de Maxwell, Markt y Mengele.
- Ruido audible en buen y mal, tiempo: Método de la BPA.
- Radio interferencias en buen y mal, tiempo: Método de la BPA..
- Campo magnético: Método por la Ley de Ampere.
- Campo eléctrico sin cargas espaciales.
- Campo eléctrico con cargas espaciales, bajo variadas condiciones climáticas: Método “Degree of corona saturation”.
- Densidad de corriente iónica por cargas espaciales: Ídem al punto anterior.

7. Aplicación a la línea del proyecto HydroAysén

Se realizará el cálculo de los campos electromagnéticos producidos por la línea HVDC del proyecto HydroAysén de Chile, cuyos parámetros principales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de la línea HVDC del proyecto HydroAysén

Potencia	2800 MW
Voltaje	±500 kV
Altura de los conductores en la torre	34 m
Altura mínima de los conductores	10 m
Distancia entre los polos	11 m
Número de subconductores	3
Diámetro de los subconductores	2,5 cm
Franja de servidumbre	40 m
Longitud	2000 Km

La línea del Proyecto HydroAysén contempla un tramo submarino de 160 Km en la zona de Chiloé. La parte submarina no presenta efecto corona, por lo tanto no emite ruido audible ni interferencias de radio. El campo eléctrico queda confinado al interior del cable. El campo magnético es la única emisión al

exterior. Los valores de campo magnético en el lecho del mar pueden ser superiores al parte aérea pero en la superficie los valores son mucho más bajos.

Los resultados de los campos electromagnéticos son presentados en la Figs. 1 a 5.

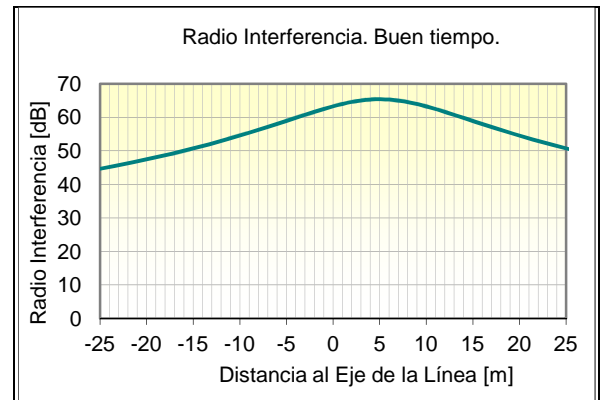


Fig. 1: Interferencias de radio en buen tiempo

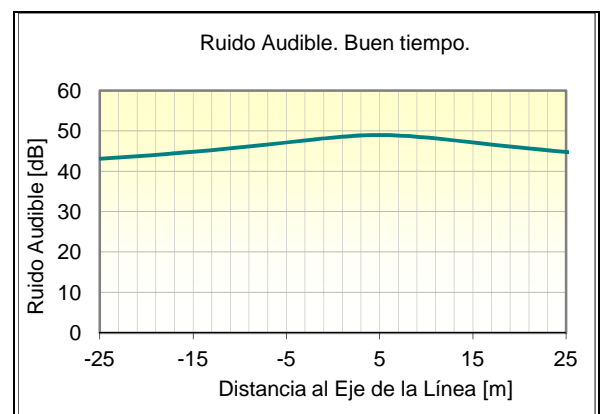


Fig. 2: Ruido audible en buen tiempo

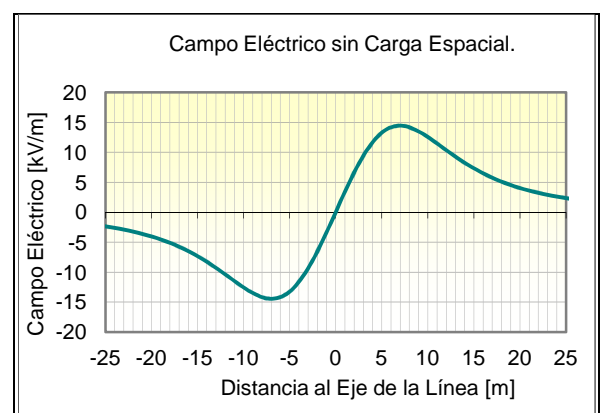


Fig. 3: Campo eléctrico sin considerar la carga espacial

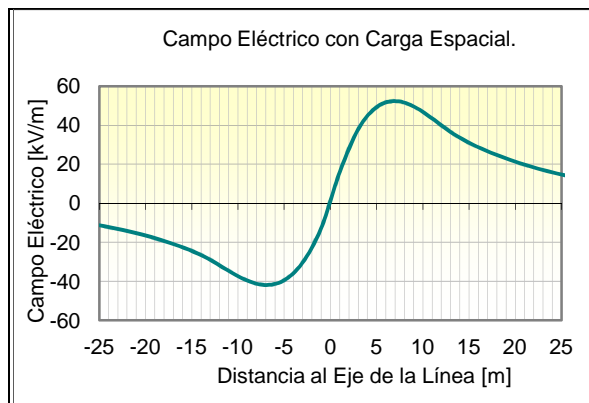


Fig. 4: Campo eléctrico considerando la carga espacial

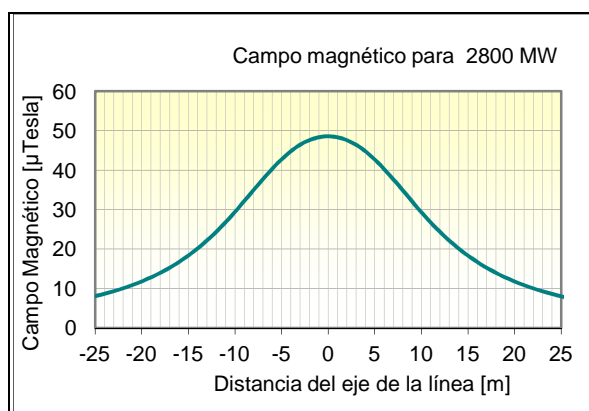


Fig. 5: Campo magnético par una potencia de 2800 MW

El proyecto de la línea Itaipú-Sao Pablo de ± 600 kV consideró 40 kV como valor máximo de campo eléctrico con carga espacial [4].

8. Conclusiones

Los métodos cálculo indicados anteriormente, fueron elegidos luego de una exhaustiva revisión y análisis, de variadas y actualizadas fuentes. Asegurándose de esta forma una aceptable precisión en los resultados.

El cálculo del campo eléctrico con carga espacial es del orden de tres veces el campo eléctrico sin carga espacial.

En general el valor del campo eléctrico con carga espacial de esta línea tiene valores relativamente altos. Se puede disminuir el valor aumentando a cuatro el número de subconductores y la altura de los conductores al suelo.

REFERENCIAS

- [1] Jardini, J. A., "HVDC Transmission Lines. Corona Effects and Fields. B2-06 (JWG.17) 24", Committee B2. Overhead Lines. JWG. B2.17. Impacts of HVDC Lines on the Economics of HVDC Projects, CIGRE, Junio, 2006.
- [2] Maruvada, P. S., Jardini, J. A., "HVDC Transmission Lines. Corona Considerations. Calculations and Results. B2-06 (JWG.17) 33", Committee B2. Overhead Lines. JWG. B2.17. Impacts of HVDC Lines on the Economics of HVDC Projects, CIGRE, Enero, 2007.
- [3] Chartier, V. L., Stearns R. D., "Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead High Voltage AC and DC Lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 1, 1981, pp. 121-130.
- [4] Chaves D., F. y otros autores, "Linhas de Transmissão de Corrente Continua. Avaliação de Campos Interferentes", XIX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2007, Rio de Janeiro, Brasil.
- [5] Meah, K., Ula, S. "Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems", IEEE 2007 PES General Meeting, 20-24 June, Tampa, Florida, USA.
- [6] Hill, H y otros autores, "Transmission Line Reference Book HVDC to ± 600 kV", Electric Power Research Institute, EPRI, 1977.
- [7] Li, Xin, "Numerical Analysis of Ionized Fields Associated with HVDC Transmission Lines Including Effect of Wind", Tesis de Doctorado en Ciencias, Universidad de Manitoba, Winnipeg, Canada, 1997.
- [8] Jardini, J. A., "HVDC Transmission Lines. Corona Effects and Fields. B2-06 (JWG.17) 24", Committee B2. Overhead Lines. JWG. B2.17. Impacts of HVDC Lines on the Economics of HVDC Projects, CIGRE, Junio, 2006.
- [9] Johnson, G. B., "Degree of Corona Saturation for HVDC transmission Lines", IEEE/PES Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990, pp 695-707
- [10] Johnson, G. B., "The effect of HVAC-HVDC line separation in a hybrid corridor", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp 1338-1350.

Luis Ortiz N.: Doctor en Ciencias de la Ingeniería, COPPE Universidad Federal de Rio de Janeiro. Profesor Asociado de la Universidad de Santiago de Chile.

Emilio Aranda B.: Ingeniero Civil Electricista de la Universidad de Santiago de Chile. Ingeniero de Proyectos en TRANSELEC.