

Evaluación teórica de radio interferencia y ruido audible en líneas de transmisión

*Esteban Velilla**, *Germán Moreno***, *Carlos A. Escobar****

(Recibido el 1.º de diciembre de 2003. Aceptado el 11 de febrero de 2005)

Resumen

Uno de los efectos de gran importancia en líneas de transmisión (LT) es el efecto corona, y es a raíz de este que se desarrollan fenómenos tales como la radio interferencia (RI) y el ruido audible (RA), los cuales con el aumento de la tensión de operación se hacen cada vez más notorios, y aumentan así la posibilidad de que tanto personas como equipos puedan ser afectados o interferidos debido a las propiedades electromagnéticas que se generan en los alrededores de la LT, y surgen así los problemas denominados de compatibilidad electromagnética (CEM). Por esta razón, se desarrolló un programa computacional en matlab (CERARI), que permite evaluar los niveles de afectación que las LT podrían generar en la servidumbre, específicamente ruidos o interferencias.

----- *Palabras clave:* líneas de transmisión, efecto corona, radio interferencia, ruido audible, compatibilidad electromagnética, servidumbre.

Theoretical evaluation of radio noise and audible noise in transmission lines

Abstract

One of the most important effects in transmission lines (TL) is the corona effect, which is the cause of related phenomena like radio noise (RN) and audible noise (AN). The magnitude of such phenomena increment their magnitude with the increase of operating voltages, therefore rising the likelihood of affecting or interfering with human beings or equipment. It is possible that, due to the electromagnetic properties of the environment surrounding TL's, problems of electromagnetic compatibility arise. A software (CERARI) that allows the evaluation of noise levels generated in the vicinity of the transmission lines was developed using Matlab and is presented in this paper.

----- *Key words:* transmission line, corona effect, radio noise, audible noise, electromagnetic compability, right of way (ROW).

* Investigador del grupo GIMEL. evh@electra.udea.edu.co.

** Profesor de ingeniería eléctrica de la Universidad de Antioquia. gmoreno@udea.edu.co.

*** Profesor de ingeniería electrónica de la Universidad de Antioquia. cescobar@udea.edu.co.

Introducción

Algunas de las perturbaciones ocasionadas por las LT son debidas al efecto corona [1-4], el cual lleva consigo un conjunto de diversas descargas eléctricas en gases (aire), que globalmente se pueden definir como interrupciones parciales en la vecindad del conductor bajo tensión, alrededor del cual se genera un campo eléctrico por lo general no uniforme, que dependerá en gran medida del tipo y magnitud de la tensión aplicada al conductor [3]. Algunas de las manifestaciones del efecto corona son: ozono, luz visible, vibración mecánica, calor alrededor de los conductores o calentamiento de la superficie, ruido audible, radio y TV interferencia, o en general interferencias electromagnéticas, etc. [1, 2].

Las descargas corona dan origen a una serie de perturbaciones en una gama de frecuencias que incluye las bandas de radio frecuencia y ruido audible. Esto debido a la naturaleza pulsante del campo electromagnético generado en los alrededores de los conductores al darse las descargas, estos fenómenos se propagan tanto en el conductor como en el espacio, alcanzando niveles que podrían afectar la recepción de otras señales en cercanías de la LT, causar irritación a personas debido a los altos niveles de ruido audible generado, y en algunos casos ser tan intensas las descargas que logren distorsionar la misma onda senoidal transportada por los conductores.

Metodologías implementadas en el software

Campo eléctrico (CE)

Con el fin de obtener el campo eléctrico tanto sobre los conductores como en los alrededores, se ha implementado la metodología de Markt y Mengele, la cual lleva en consideración los acoples existentes tanto propios como mutuos de los conductores equivalentes, así como el número de subconductores por haz, mediante conductores equivalentes [2, 4].

Se plantea así un problema de contornos, y para su solución se requiere especificar los potenciales

en los conductores y la geometría de la LT, para luego hallar la carga respectiva de cada conductor equivalente [2, 4], surgiendo un sistema matricial de la siguiente forma:

$$|\lambda| = |P|^{-1} * |V|$$

Donde

λ = Carga por unidad de longitud (C/m).

V = Vector de potenciales eléctricos asociados a los conductores (V).

P = Matriz de coeficientes de Maxwell (m/F).

La inversa de la matriz de coeficientes de Maxwell representa los acoples capacitivos entre conductores y entre conductores y tierra [2, 4].

Al resolver el sistema anterior, se puede conocer la carga de cada conductor equivalente y hallar entre otras:

Los máximos gradientes de potencial superficiales, por medio de:

$$E_n = \frac{1}{2 * \pi * \epsilon} \left(\frac{2\lambda}{Nd} \right) \left[1 + \frac{d}{D} (N - 1) \right]$$

Donde

E_n = Gradiente de potencial superficial máximo por fase.

N = Número de subconductores por haz.

d = Diámetro de los subconductores.

D = Diámetro de los conductores equivalentes.

ϵ = Permitividad del aire.

El CE en un punto en el espacio, es la resultante de las contribuciones de las cargas de los conductores:

$$E = \sum_i E_i = \sum_i \frac{\lambda_i}{2\pi\epsilon r_i} \vec{r} \text{ (V/m)}$$

Con r , como el vector de distancia desde un punto en el espacio al conductor i .

Ruido audible (RA)

Se ha implementado la metodología desarrollada por el EPRI, la cual permite llevar en consideración tanto la propagación como la absorción de las ondas esféricas de sonido en el aire, y además llevar incluido el rango de frecuencias concebidas al umbral auditivo humano, permitiendo así, la contrastación de los valores teóricos con mediciones realizadas en la escala de ponderación A [1, 5-8]. Es de resaltar que en Colombia aún no existen valores limitantes de RA generado por LT.

La metodología permite evaluar el RA final como una superposición del RA producido por cada conductor, de la siguiente manera, para condiciones de lluvia fuerte:

Primero se ha de obtener la función $A1$ encargada de generar la potencia acústica en el periodo de lluvia fuerte por medio de [1]:

$$A1 = 20\log(N) + 44\log(100*d) - \left(\frac{655}{En}\right) + Km \text{ (dB)}$$

Donde Km , es un factor de corrección que depende de N [1, 4].

Luego se incluyen los efectos tanto de propagación como de absorción en el medio, dando como resultado [1]:

$$P(20\mu Pa) = A1 - 10\log(r) - 0.02r \text{ (dB)}$$

Donde

r = Distancia del conductor al punto de cálculo (m).

$20\mu Pa$ Referencia tomada para expresar el nivel de presión sonora P en dB.

Y para finalizar, se hace la suma de las contribuciones de cada conductor al RA final, de la siguiente forma:

$$P_{total} \text{ (dB)} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{P_i/10}$$

Donde

n = Número de conductores de fase.

P_i = Potencia acústica por conductor (dB).

Si se desea calcular el RA para otras condiciones tales como buen tiempo o conductor mojado, se deberán hacer correcciones a las ecuaciones anteriores [1].

Radio interferencia (RI)

En cuanto al cálculo de RI, se optó por el método analítico desarrollado en [1, 9], que permite obtener la radio interferencia resultante por el efecto corona dependiendo de la generación del RI, de la propagación de RI a lo largo de la línea y la intensidad resultante de RI en la vecindad de los conductores.

En esta metodología se parte de una función de generación (Γ), encargada de caracterizar el efecto de la generación de ruido producido por los pulsos de corriente corona inyectados en los conductores debidos al efecto corona. Esta función se evalúa así:

$$\Gamma = 78 - \frac{580}{E_n} + 38\log\left(\frac{100*d}{3.8}\right) + k_n$$

Con K_n como factor de ajuste, que depende de N [1].

A partir de Γ , se determinan los voltajes y corrientes corona inyectados en los conductores, que producirán RI, a través de:

$$[I_0] = \frac{[C]*[\Gamma]}{2\pi\epsilon} \text{ y } V_0 = Z_0 I_0$$

Donde

I_0 = Vector de corrientes corona inyectadas.

V_0 = Vector de voltajes resultantes.

C = Matriz de capacitancias de la LT.

Z = Matriz de impedancias de la LT.

Estas corrientes están asociadas a voltajes y estos a su vez a CE propagados a lo largo de los conductores; la RI final es la causada por el campo eléctrico resultante, el cual puede ser calculado por medio del análisis modal, que permite encontrar de forma independiente, las contribuciones de cada fase en cada modo [1, 4].

$$E_k = \left[2 \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n \left(\frac{W_k^{(a)} W_k^{(b)}}{\alpha^{(a)} + \alpha^{(b)}} \right) \right]^{1/2}$$

Donde

n = Número de fase.

α = Constantes de atenuación [1].

k = Fase con efecto corona.

$W_k^{(m)}$ Es la contribución al campo corona dada por las tres fases cuando la fase k está en corona, y la forma de hallarlo para las fases existentes es a través de:

$$W_k^{(m)} = 30[F][P]^{-1}[G_k]$$

En esta ecuación, m hace alusión al modo, F es una matriz de distancias asociada a los conductores de fase, P es la matriz de coeficientes de potencial y G_k es la columna k de la matriz transformada de la función de generación [1]. Se obtiene de esta forma el campo total generado por los pulsos corona de la fase k , llamado campo de RI, referido a $1 \mu\text{V/m}$, y expresado en dB.

Resultados

En una LT existe gran cantidad de parámetros que afectan las magnitudes de los gradientes superficiales; éstos, al superar los valores de la rigidez dieléctrica del aire o gradiente crítico (cerca de $21,1 \text{ kV/cm rms}$, bajo condiciones estándar) [3], dan inicio al efecto corona, modificando así tanto el RA como el RI; algunos de estos parámetros son: tensión de operación, separación de fases, número y diámetro de subconductores en el haz, separación entre subconductores, tipo de haz (regular o irregular), secuencias de fases,

condiciones climatológicas, etc. A continuación se presentan resultados de cálculo para líneas de transmisión específicas.

Características de la LT

Tensión de operación 500 kV, frecuencia 60 Hz, configuración horizontal, dos subconductores por haz, diámetro de subconductor de 2,960 cm, espaciamiento entre subconductores de 45,7 cm, separación entre fases de 10 m y altura de fases de 14,5 m.

En la figura 1 se muestra la disposición física de los conductores que representarían al haz de subconductores, o sea, los conductores equivalentes [1, 4].

Gradientes de potencial versus diámetro y subconductores

En la figura 2 se presenta el comportamiento de los gradientes superficiales en los conductores sometidos a una tensión de 500 kV, a partir de la variación del diámetro y número de subconductores por haz, esto permite identificar los posibles diámetros óptimos y números de subconductores por haz, para que los gradientes

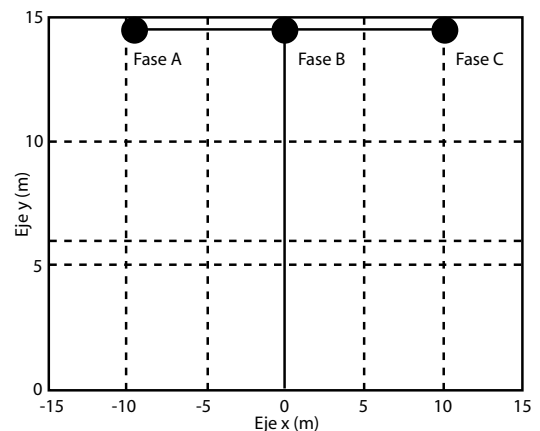


Figura 1 Geometría de la línea de transmisión

Nota. Los resultados que se presentarán a continuación, se han obtenido con base en varias publicaciones [6-8, 10], y se ha despreciado la influencia de cables de guarda.

superficiales en los subconductores no superen la rigidez dieléctrica del aire [3], evitando así las descargas parciales en sus alrededores, y por ende evitando tanto la aparición del efecto corona, como los fenómenos que lleva asociado.

Gradientes versus tensión y subconductores

En la figura 3, para la misma configuración, se observa la variación de los gradientes superficiales, dependiendo de la tensión y número de subconductores, mostrándose el porqué en alta tensión es usual trabajar con varios subconductores por haz. Cabe destacar que a la tensión de 500 kV es más factible que se supere la rigidez dieléctrica del aire, ya que, como se muestra, los gradientes son de magnitudes muy significativas.

Para el caso de dos subconductores por haz, tensión de operación de 500 kV y conservando la geometría de LT establecida con anterioridad,

el RA en condiciones de lluvia fuerte será como se muestra en la figura 4:

En la figura 4 se puede apreciar el comportamiento de los conductores como fuentes de generación de ondas esféricas de sonido, propagadas en el espacio; y la variación de los niveles de RA alcanzados en los alrededores de la LT, obteniéndose magnitudes que podrían ser perjudiciales o incómodas para el oído, estas magnitudes están clasificadas dependiendo del lugar donde se encuentre la LT [8].

RA versus tensión

Manteniendo las condiciones anteriores ($N = 2$), se obtendría para una tensión de 110 kV, RA y RI negativo, cuya interpretación es que los gradientes superficiales están muy por debajo del gradiente crítico que daría inicio a las descargas parciales (véase figura 5), por lo tanto no habría efecto corona ni sus manifestaciones. A 230 kV

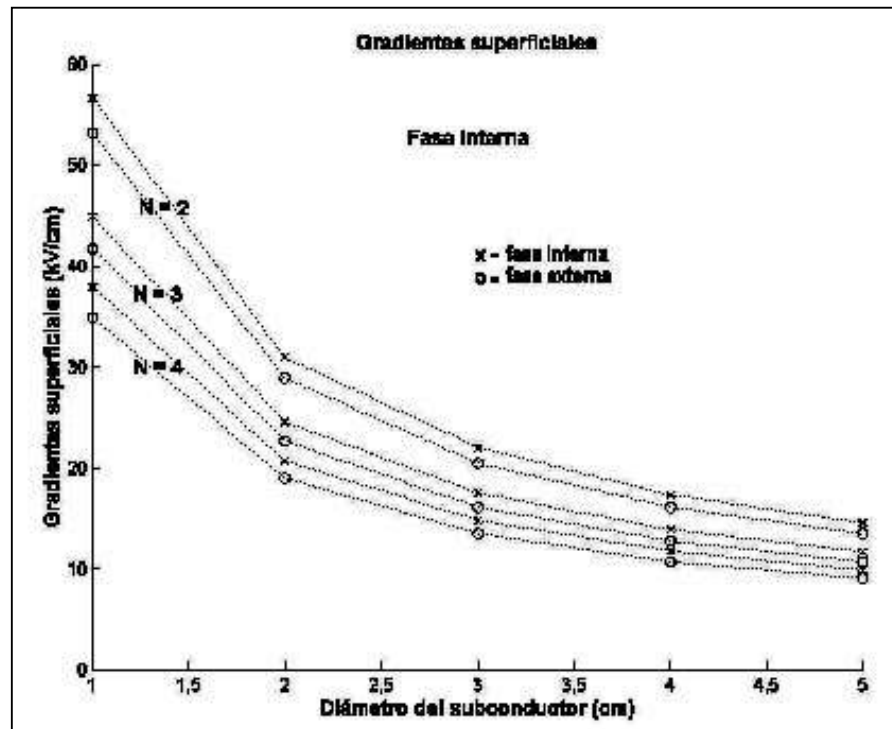


Figura 2 Gradientes versus número y diámetro de los subconductores

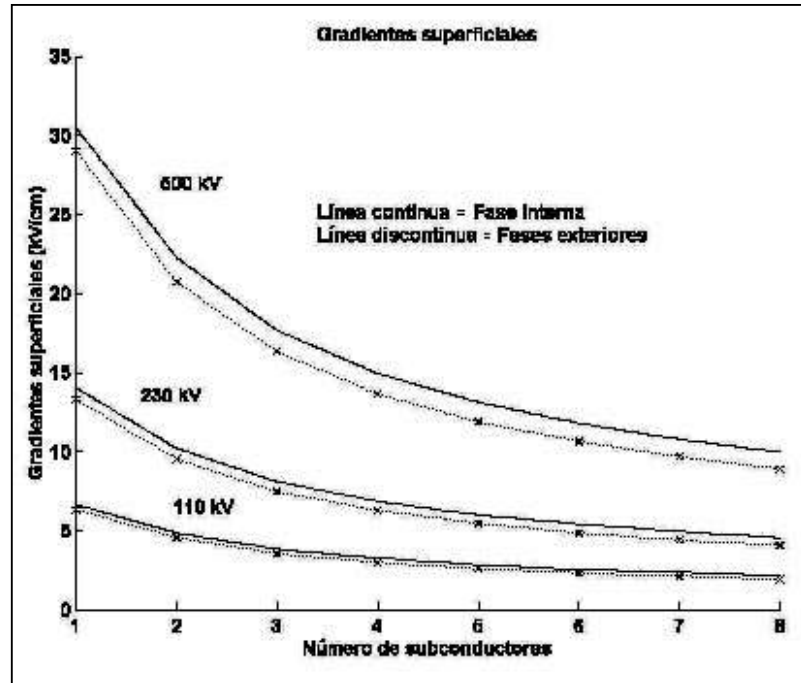


Figura 3 Gradientes versus tensión y número de subconductores

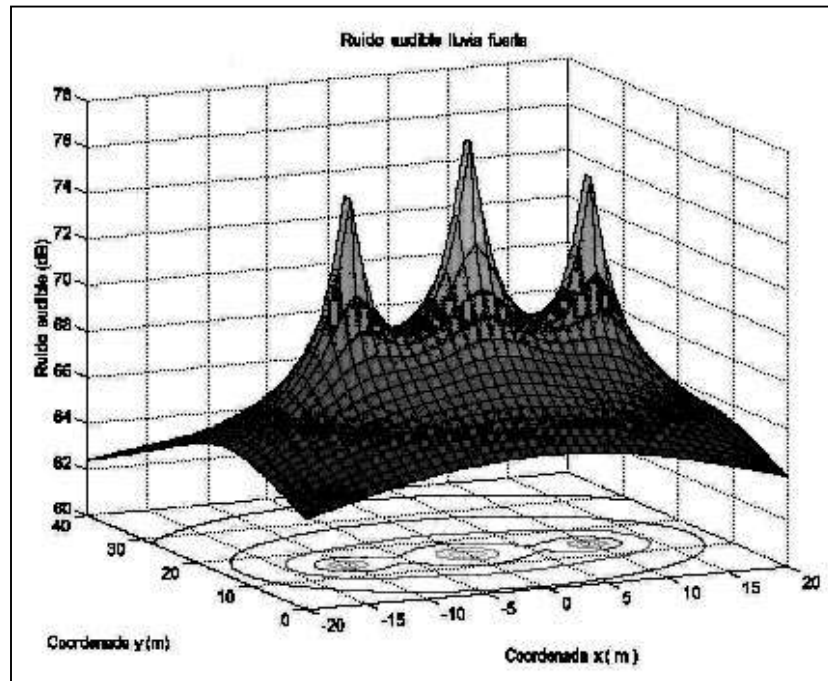


Figura 4 Niveles de ruido audible en el espacio vecino a la línea

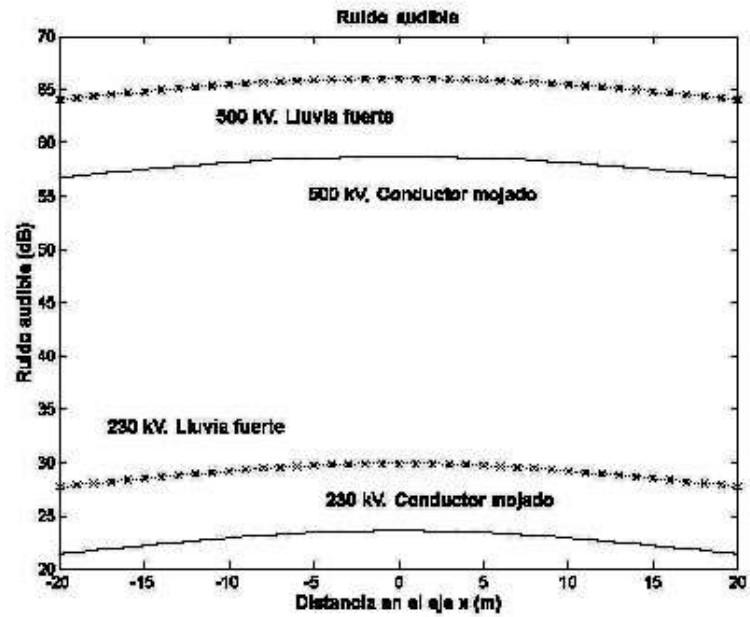


Figura 5 Ruido audible *versus* tensión

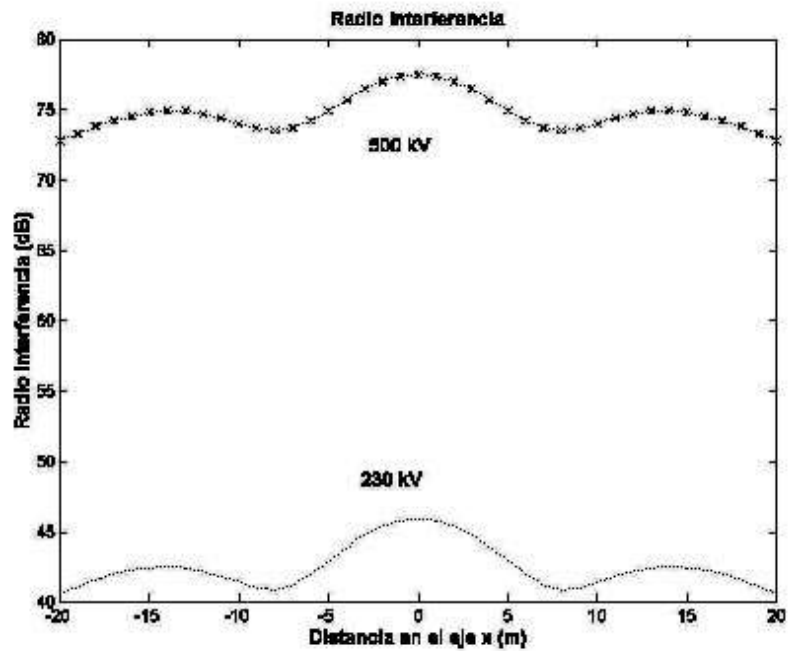


Figura 6 Radio interferencia *versus* tensión

apenas empezará a ser percibido el RA en el umbral auditivo humano [1], mientras que a 500 kV, el RA ya sí es notorio.

RI versus tensión

Manteniendo las condiciones iguales al caso anterior, y teniendo en cuenta que los valores aceptados de RI, dependen de la señal por perturbar y de la distancia a la que se encuentren las fuentes de estas señales, que son principalmente las de AM, las simulaciones se hicieron a 1000 kHz y a una altura sobre el suelo de 1,5 m, con los resultados mostrados en la figura 6.

Se confirma así, que los fenómenos de RA y RI, se hacen más notorios, a medida que se aumenta la tensión de operación.

Conclusiones

Se logró implementar las metodologías antes citadas en el software CERARI, permitiendo la aplicación de unas de las metodologías aceptadas para la evaluación de estos problemas de la transmisión de energía eléctrica, que son de importancia mundial, brindando la posibilidad de hacer diseños óptimos de LT, con el fin de no afectar de forma significativa el entorno.

Se logró identificar parámetros en la LT que intervienen en la afectación de los fenómenos generados por el efecto corona tales como el RA y RI.

Reconocimientos

Este trabajo se ha desarrollado gracias al acompañamiento del: GIMEL, Pablo Berrío, Francisco

Saldarriaga, el equipo de diseño de líneas de transmisión de ISA y de Carolina Ramírez.

Referencias

1. Electric Power Research Institute. *Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above / Second Edition Revised*. California. 1982.
2. Ortiz, L, “Estudo da influencia dos parâmetros no cálculo do campo eléctrico nos condutores, nas perdas corona e no ruído acústico das linhas de transmissão”, Tesis de Maestría. Universidad Federal de Rio de Janeiro. Brasil. 1982.
3. Peek, F. *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*. McGraw-Hill. New York. 1929.
4. Velilla, E, “Validación de los programas ACDCLINE, CORRIDOR, RNOISE y Servid, para cálculo de campo eléctrico, magnético, radio interferencia y ruido audible producidos por líneas de transmisión”. Práctica estudiantil. Interconexión Eléctrica S. A. ISA. 2003.
5. IEEE Std. 656. “IEEE standard procedures for measurement of audible noise from overhead transmission lines”. 1992.
6. IEEE Std. 644. “IEEE standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC power lines”. 1994.
7. IEEE Std. 539. “IEEE standard definitions of term relating to corona and field effects of overhead power lines”. 1990.
8. Ministerio de salud. *Compendio de normas legales sobre salud ocupacional*. Resolución 08321. Artículo-17. Colombia. Agosto de 1983.
9. IEEE Corona and field effects subcommittee report radio noise working group, “A survey of methods for calculating transmission line conductor surface voltage gradients”. *IEEE Transactions on power apparatus and systems*. Vol. 1. N.º 6. USA. 1979.
10. ANSI/IEEE Std. 430. “IEEE Standard procedures for the measurement of radio noise from overhead power lines and substations”. 1986.