

MITIGACIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN UTILIZANDO BUCLES PASIVOS

DIEGO RAÚL CADAVID¹
DAVID ALEJANDRO RAMÍREZ²
FREDDY LOPERA³
ANDRÉS FELIPE CORREA⁴

RESUMEN

En este artículo se presenta un método simple para determinar el campo magnético generado por líneas de transmisión. El cálculo del campo magnético tiene en cuenta los efectos de mitigación de bucles pasivos, incluyendo su ubicación óptima en la línea mediante la aplicación de algoritmos genéticos. Los resultados de los cálculos son validados mediante reportes de casos publicados en el IEEE, software de análisis de campo electromagnético y datos experimentales arrojados de una implementación realizada en las líneas de alimentación de las torres de iluminación en un estadio. Luego del análisis, se demuestra la validez del método y la factibilidad de aplicarlo en líneas de transmisión del sistema de potencia.

PALABRAS CLAVE: líneas de transmisión; mitigación de campo magnético; algoritmo genético; bucle pasivo.

MAGNETIC FIELD MITIGATION OF TRANSMISSION LINES USING PASSIVE LOOPS

ABSTRACT

A simple method to determine the magnetic field generated by transmission lines is presented in this paper. The magnetic field calculation takes into account the mitigating effects of passive loops, including their optimal position in the line by applying genetic algorithms. Calculations results are validated by case reports published in the IEEE Transactions, software package for electromagnetic field analysis, and experimental data obtained from

1 Ingeniero Electricista y Magíster en Ingeniería, Universidad de Antioquia. Investigador Grupo de Manejo Eficiente de la Energía –GIMEL–, Universidad de Antioquia. dcadauid@udea.edu.co

2 Ingeniero Electricista, Universidad de Antioquia. Ingeniero, Ingeniería de Alta Calidad. Medellín, Colombia. dalejandro80@yahoo.com

3 Ingeniero Electricista, Universidad de Antioquia. Ingeniero, Ingeniería de Alta Calidad. Medellín, Colombia. frelopera@yahoo.com

4 Ingeniero Electricista, Universidad de Antioquia. Ingeniero, Ingelel, Medellín, Colombia. andresfelipe30@hotmail.com

an implementation made in the power lines at a stadium lighting tower. After the analysis, the method's validity and feasibility of its application to transmission lines power systems are demonstrated.

KEY WORDS: transmission lines; magnetic field mitigation; genetic algorithm; passive loop.

MITIGAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO BUCLES PASSIVOS

RESUMO

Neste artigo se apresenta um método simples para determinar o campo magnético gerado por linhas de transmissão. O cálculo do campo magnético leva em conta os efeitos de mitigação de loops passivos, incluindo sua localização ótima na linha mediante a aplicação de algoritmos genéticos. Os resultados dos cálculos são validados mediante reportes de casos publicados no IEEE, software de análise de campo eletromagnético e dados experimentais arrojados de uma implementação realizada nas linhas de alimentação das torres de iluminação em um estádio. Depois da análise, se demonstra a validade do método e a factibilidade de aplicá-lo em linhas de transmissão do sistema de potência.

PALAVRAS-CÓDIGO: linhas de transmissão; mitigação de campo magnético; algoritmo genético; loop passivo.

1. INTRODUCCIÓN

El campo magnético a frecuencia industrial está presente en la mayor parte de nuestro entorno, dado que las líneas de transmisión (LT) están ubicadas tanto en zonas rurales como urbanas. Por esta razón, es de gran interés para la comunidad científica y técnica y para algunos sectores gubernamentales analizar los efectos sobre las personas y equipos eléctricos y electrónicos asociados a la interacción directa con campos magnéticos. Este interés se ha reflejado en la ejecución de múltiples investigaciones y la expedición de normas que establecen límites de exposición a campos electromagnéticos (NIEHS EMF-RAPID Program Staff, 1999; Informe de ICNIRP, 1998). En Colombia, por ejemplo, para personas expuestas a campos electromagnéticos, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas –RETE– (Minminas, 2008) limita la densidad de flujo magnético a 60 Hz en 100 μ T.

Por otro lado, los estudios coinciden en que para abordar el problema de campos electromagnéticos se deben considerar dos pasos. El primero consiste en calcular las intensidades de campo mag-

nético generados por las LT; en este sentido, varias publicaciones técnicas se han presentado en la literatura. De acuerdo con Memari y Janischewskyj (1996) y Memari (2005), el cálculo del campo magnético producido por una LT comienza con el conocimiento de su geometría y sus condiciones de carga, luego se calcula como la suma vectorial del campo magnético generado por cada conductor; este método es ideal para implementar en programas de simulación. En Kaune y Zaffanella (1992) se presentan expresiones analíticas para calcular el campo magnético lejano, sin embargo, no son adecuadas para determinar el comportamiento del campo magnético cercano, por ejemplo, debajo de la LT. En Pettersson (1996) la expansión multipolar fue utilizada para derivar expresiones analíticas simples de cálculo de campo magnético mediante la identificación de vectores espaciales de dos dimensiones (2D) con números complejos; el único problema es la confusión que se genera al utilizar los números complejos como fasores. Filippopoulos y Tsanakas (2005) expusieron un novedoso método de cálculo de campo magnético utilizando el doble número complejo, el cual usa dos unidades imaginarias y permite la



representación simultánea de vectores y fasores; el método es válido para distancias lejanas y cercanas a la línea. En este artículo, el campo magnético será calculado teniendo en cuenta diferentes aproximaciones y suposiciones basadas en las anteriores referencias, en particular aplicando las simplificaciones presentadas en Cruz e Izquierdo (2003), de tal manera que el error sea mínimo, tanto para distancias cortas como largas de la LT.

El segundo paso para abordar el problema de campos electromagnéticos consiste en determinar la efectividad y viabilidad de las técnicas de mitigación. En general, se han desarrollado diferentes técnicas para determinar el apantallamiento del campo magnético; se pueden encontrar expresiones analíticas para geometrías sencillas, y para las más complicadas se utiliza técnica numérica. En Cadavid *et al.* (2007) se mencionan diversos métodos para mitigar el campo magnético producido por una LT, tales como incrementar la distancia entre los conductores de la LT, apantallar los conductores de la LT, balancear las corrientes de fase, utilizar láminas conductoras y ferromagnéticas, instalar bucles activos o pasivos y reorganizar las fases en diferentes circuitos. En este artículo se implementa el efecto de mitigación de bucles pasivos considerando los procedimientos presentados en Memari y Janischewskyj (1996), en Memari (2005) y en Yamazaki, Kawamoto y Fujinami (2000). La posición óptima del bucle se determinará mediante la aplicación de algoritmos genéticos.

Los resultados de los cálculos son validados mediante reportes de casos publicados en el IEEE, software de análisis de campo electromagnético y datos experimentales arrojados de una aplicación realizada en las líneas de alimentación de las torres de iluminación en un estadio.

2. CÁLCULO DE CAMPO MAGNÉTICO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Para calcular el campo magnético en una LT, se acogen las siguientes suposiciones:

1. Los conductores de la LT se consideran rectos y horizontales, despreciando así la flecha de la línea.
2. El largo de la línea se supone infinito.
3. Los conductores son cilíndricos, el radio de los conductores es pequeño en comparación con su longitud y la altura sobre el suelo.
4. Se desprecian el desnivel del terreno, la resistividad y los cambios de dicha resistividad debidos a condiciones ambientales.
5. Se desprecia la influencia de estructuras como torres, soportes u otros objetos.

Las anteriores suposiciones implican que se tendrá la misma condición a lo largo de toda la línea y, por tanto, sólo es necesario realizar cálculos en un plano perpendicular al eje de la línea, es decir, en dos dimensiones.

6. Se desprecia el efecto de las corrientes inducidas en la tierra debido al campo magnético producido por las líneas.
7. Se desprecia el campo magnético producido por las corrientes eddy.

En el reporte presentado por IEEE Magnetic Fields Task Force (1998), se mostró que el campo magnético es afectado por la presencia de las corrientes eddy, especialmente a largas distancias de la línea. Cada corriente de retorno está en el subsuelo a una profundidad compleja, δ , dada por:

$$\delta = 503 \cdot (\rho_g / f)^{0.5} \quad (1)$$

Donde ρ_g es la resistividad de la tierra y f es la frecuencia.

Los valores típicos de δ a 60 Hz están entre 500 m y 1000 m. Dado que las distancias consideradas en este trabajo son muy inferiores a estos valores, la influencia de las corrientes eddy no se consideró.

8. Se desprecia el efecto del campo magnético producido por la corriente inducida en el cable de guarda sobre la línea de transmisión.

9. Se desprecia el efecto de la corriente inducida entre las mismas fases.

Cruz e Izquierdo (2003) muestran que, en general, las anteriores suposiciones originan un error menor del 5 % en los cálculos totales del campo magnético.

En este trabajo, la base para el cálculo del campo magnético es la ley de Biot-Savart que, con base en las suposiciones anteriores, permite determinar el campo magnético en algún punto del espacio en términos de la corriente. Primero se calculó el campo generado por cada conductor que conforma la LT, luego se sumaron vectorial y fasorialmente cada uno de los campos para encontrar el campo total dado por:

$$H_{i,j} = \frac{I_i \cdot r_{i,j}}{2\pi \cdot r_{i,j}} = \frac{I_i}{2\pi \cdot r_{i,j}} \phi_{i,j} \quad (2)$$

Donde $H_{i,j}$ es la intensidad de campo magnético en el punto j debido a la corriente I_i ; $r_{i,j}$ es la distancia desde el punto de medición (x_j, y_j) al conductor con corriente I_i . El flujo magnético $\phi_{i,j}$ está dado por:

$$\phi_{i,j} = -\frac{y_i - y_j}{r_{i,j}} u_x + \frac{x_i - x_j}{r_{i,j}} u_y \quad (3)$$

Donde u_x y u_y son los vectores unitarios en la dirección de los ejes horizontal y vertical respectivamente, como se muestra en la figura 1.

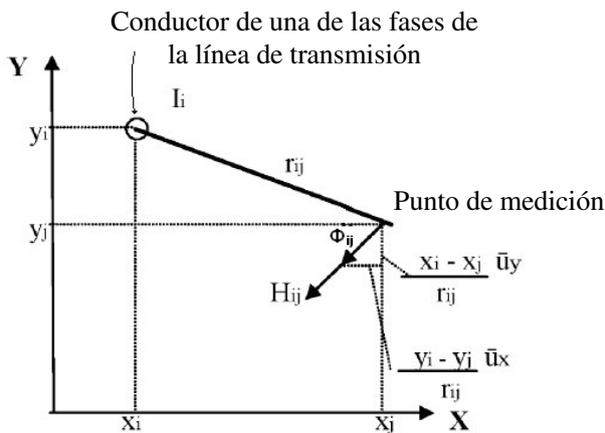


Figura 1. Diagrama fasorial de la intensidad del campo magnético para un conductor de una LT

La intensidad de campo magnético total está dada por:

$$H_j = \sum_i \frac{I_i}{2\pi \cdot r_{i,j}} \phi_{i,j} \quad (4)$$

El procedimiento anterior se implementó en MATLAB 7.0; el archivo se denomina FMLOOP.

3. LAZOS DE CONDUCTORES CERRADOS (BUCLES PASIVOS)

Una de las técnicas de mitigación de campo magnético se conoce como lazos de conductores cerrados o bucles pasivos, que consiste en un circuito paralelo a la línea de transmisión, ubicado entre la línea y la tierra, en la zona de servidumbre, y que consta de dos cables paralelos a la línea e interconectados en sus extremos formando un lazo cerrado o bucle, como se muestra en la figura 2.

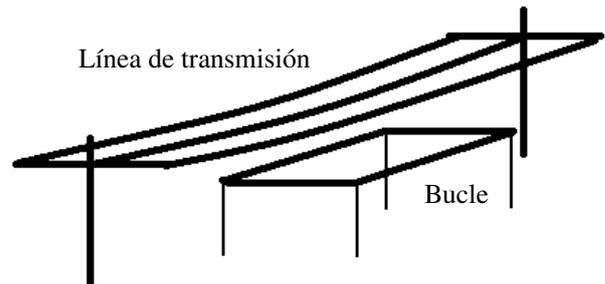


Figura 2. Línea de transmisión y bucle

El campo magnético original de la LT induce una corriente en el bucle que genera un flujo contrario al de la línea, cancelando parcialmente el campo original. La corriente inducida en el bucle no tiene una fuente externa más que la línea misma, lo cual indica que es proporcional a la cantidad de corriente que lleva la línea. En general, la efectividad de mitigación del bucle depende de la corriente inducida, del ancho y su ubicación. De modo similar a la línea de transmisión, se consideran las siguientes suposiciones para calcular los parámetros del bucle (Cruz e Izquierdo, 2003):



1. La longitud del bucle es mínimo 15 veces mayor que su anchura.
2. Se desprecia la corriente inducida en los conductores de la LT por efecto del bucle.

Para determinar el campo magnético producido por el bucle, se deben seguir los pasos sugeridos por Memari y Janischewskij (1996), por Memari (2005) y por Yamazaki, Kawamoto y Fujinami (2000):

- Calcular el voltaje inducido en el bucle.
- Calcular la impedancia del conductor del bucle.
- Calcular la corriente que fluye a lo largo del bucle.
- Calcular el campo magnético producido por la corriente del bucle.

El voltaje inducido en el bucle se deriva de la ley de Faraday:

$$V = -j\omega\phi_m \quad (5)$$

Donde V es el voltaje inducido en el bucle, ω es la frecuencia angular y ϕ_m es el flujo magnético que circunda al conductor del bucle. El flujo magnético ϕ_m es causado por la variación sinusoidal de la corriente en cada una de las fases de la LT, puede expresarse por:

$$\phi_m = \int \vec{\Phi} \cdot d\vec{A} = \ell \int_{x_1}^{x_2} B dx \quad (6)$$

Considerando las coordenadas del conductor de fase y del conductor del bucle de la figura 3, el flujo magnético puede expresarse como:

$$\phi_m = \frac{-\mu_o \cdot \ell \cdot I}{4\pi} Ln \frac{(x_2 - x_c)^2 + (z_0 - z_c)^2}{(x_1 - x_c)^2 + (z_0 - z_c)^2} \quad (7)$$

Donde μ_o es la permeabilidad relativa del aire, I es la corriente del conductor de fase y ℓ es la longitud del conductor del bucle. Considerando un sistema de tres fases, el flujo total que penetra en el bucle está dado por:

$$\phi_{m_total} = \phi_{m1} + \phi_{m2} + \phi_{m3} \quad (8)$$

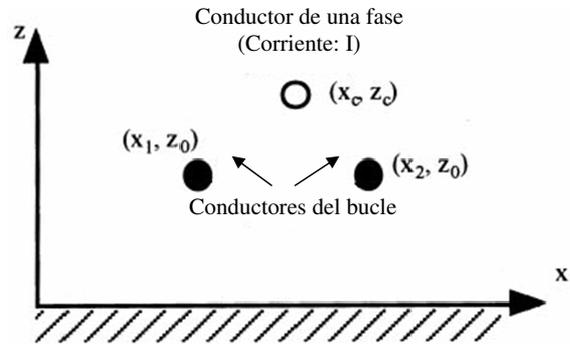


Figura 3. Coordenadas y posiciones de los conductores de fase y bucle

La corriente inducida en el bucle, I' , y el voltaje inducido para un sistema multifase están dados por:

$$V e^{j\theta_v} = \omega\phi_{m_total} e^{j(\theta_\phi - \pi/2)} = V \angle \theta_v \quad (9)$$

$$I' e^{j\theta_i} = \frac{V}{Z} e^{j(\theta_v - \theta_z)} = I' \angle \theta_i \quad (10)$$

Donde θ_v , θ_ϕ , θ_i son los ángulos del voltaje inducido, flujo magnético total y corriente inducida respectivamente, y Z es la impedancia del bucle. Z es expresado considerando su resistencia R y su autoinductancia L como:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}, \theta_z = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \quad (11)$$

Donde θ_z , es el ángulo de la impedancia.

La autoinductancia está dada por:

$$L = 4 \cdot 10^{-7} \ell \cdot Ln \left(\frac{|x_2 - x_1|}{r} \right) \quad (12)$$

Donde r es el radio del conductor del bucle. El campo magnético resultante es una suma vectorial, como se muestra en la figura 4. Las anteriores ecuaciones se implementaron en el programa FMLOOP.

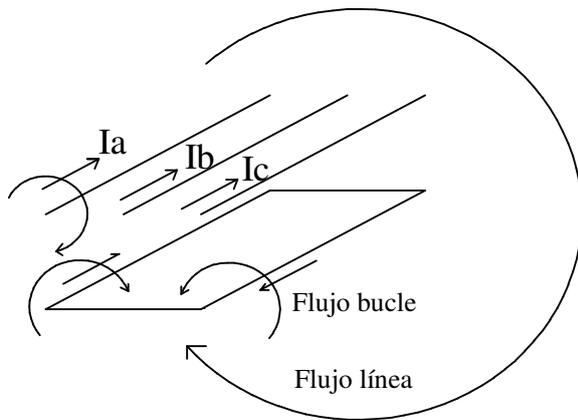


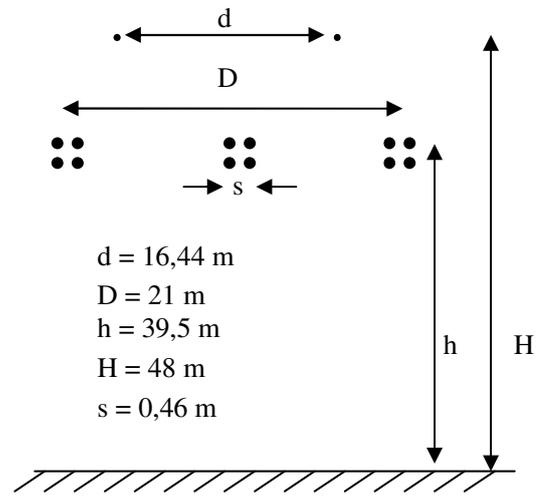
Figura 4. Dirección del campo magnético en una LT horizontal con bucle

4. VALIDACIÓN DEL PROGRAMA FMLOOP

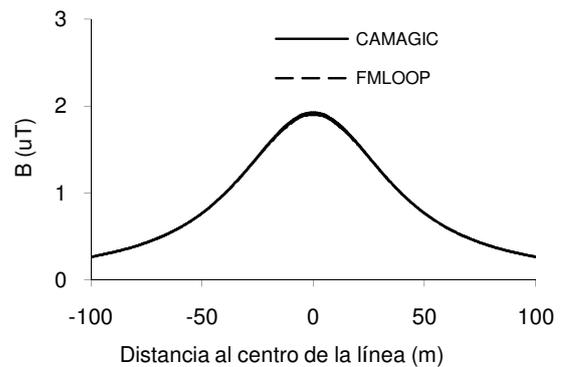
El programa implementado FMLOOP fue validado realizando una comparación de los datos obtenidos con algunas publicaciones de IEEE y el programa CAMAGIC (Moreno, 1993). Por restricciones de espacio, en este artículo se desarrolla sólo el caso presentado en Yamazaki, Kawamoto y Fujinami (2000).

4.1 Cálculo de campo magnético en una línea de transmisión

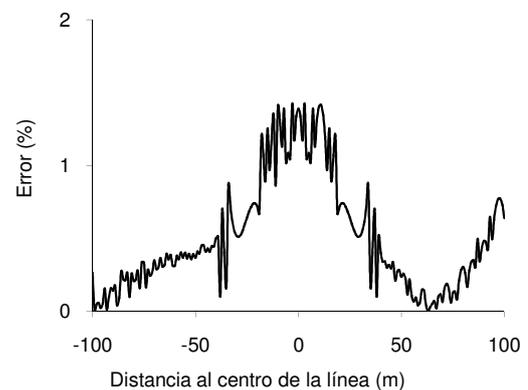
El caso considerado es una LT de 500 kV, corriente de 2500 A, vano de 230 m y radio del subconductor de 25,16 mm; la densidad de campo magnético se calculó a 1 m sobre el suelo; la configuración se ilustra en la figura 5a. La figura 5b muestra la densidad de campo magnético calculada por CAMAGIC y FMLOOP. La figura 5c indica que el error en el cálculo de la densidad de campo magnético B es menor del 2 %. El máximo error obtenido al comparar los resultados de FMLOOP con reportes de IEEE fue de 5 % cuando todos los datos eran conocidos, y menor del 10 % cuando se desconocían algunos datos del sistema.



(a)



(b)



(c)

Figura 5. Perfil de densidad de campo magnético en una LT: (a) configuración de la LT, (b) simulación con FMLOOP y CAMAGIC, (c) porcentaje de error entre FMLOOP y CAMAGIC



4.2 Cálculo del campo magnético y corriente en el bucle

Los resultados del programa FMLOOP en el cálculo del voltaje y la corriente inducidos en un bucle fueron comparados con los reportados en Yamazaki, Kawamoto y Fujinami (2000), según muestra la tabla 1. El caso considerado es una LT horizontal de 750 kV, corriente de 1500 A por fase, conductores separados a 15 m, conductor de bucle de 394 m² (0,131 Ω/Km) y frecuencia de la red 50 Hz. El sistema se ilustra en la figura 6.

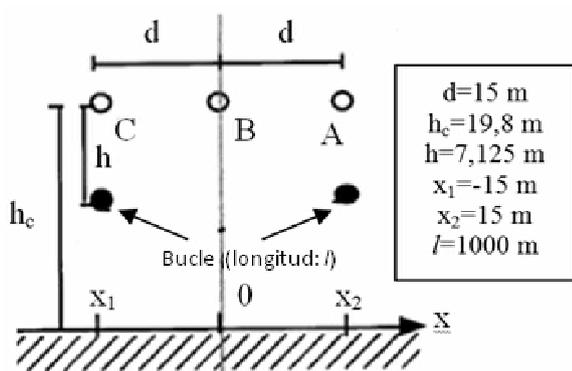


Figura 6. Configuración de la LT horizontal (Yamazaki, Kawamoto y Fujinami, 2000)

Tabla 1. Comparación entre los resultados tomados de Yamazaki, Kawamoto y Fujinami (2000) y FMLOOP

	Voltaje inducido (V)	Corriente Inducida (A)
Yamazaki, Kawamoto y Fujinami (2000)	239 (-60°)	233 (-135°)
Simulación FMLOOP	239,15 (-60°)	232,65 (-134,78°)

El algoritmo también fue comparado con los resultados presentados por Cruz e Izquierdo (2003) y se encontraron errores menores del 0,1 %. Los resultados anteriores muestran que el programa FMLOOP calcula con buena precisión tanto la densidad de campo magnético en una LT como la corriente inducida en el bucle.

4.3 Validación experimental

Este apartado tiene como finalidad mostrar el proceso de validación experimental realizado al programa FMLOOP. Para ello, en todas las medidas se tuvieron en cuenta las recomendaciones de trabajos realizados en otras investigaciones (Mamishhev y Russell, 1995; Backus, Olsen y Stearns, 1995). El calibre del conductor de bucle fue un No. 2/0 de cobre, con una impedancia DC de 0,261 Ω/Km y diámetro de 9,96 mm; el bucle se ubicó a una distancia de 0,1 m de la línea, la medición de densidad de campo magnético se hizo a una altura de 0,5 m del suelo. La figura 7 exhibe el montaje experimental; los datos de

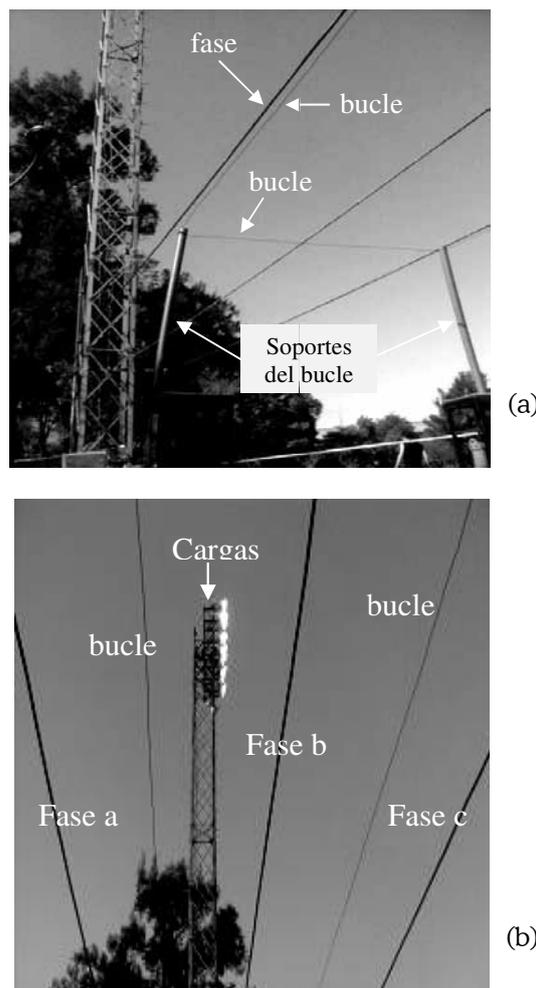


Figura 7. Fotografías del montaje experimental: (a) configuración, (b) cargas utilizadas

la configuración y la carga se presentan en la tabla 2. Los resultados medidos y simulados del voltaje y corriente inducidos en el bucle se muestran en la tabla 3. La figura 8 muestra los valores de densidad de campo magnético medido y simulado utilizando el bucle pasivo.

Tabla 2. Configuración del montaje experimental

Distancias	[m]
Entre fases	1,1
Vano	34
Altura de la línea al punto de medida	1,9
Corrientes de fase	[A]
Fase A	39,8
Fase B	34,4
Fase C	39
Voltaje de fases	[V]
Fase A	119,5
Fase B	118,0
Fase C	118,8

Tabla 3. Resultados de la simulación y medida experimental

	Voltaje inducido en el bucle [V]	Corriente inducida en el bucle [A]
Medido	0,33 (-20,718)	16,97 (-178°)
Simulado FMLOOP	0,462 (-19,67°)	13,76 (-112,9°)

Los resultados experimentales determinan que el algoritmo implementado puede ser utilizado como una herramienta para análisis de sensibilidad y cálculo de campo magnético de una LT con bucle y sin bucle. La figura 9 ilustra cómo la corriente inducida en el bucle se opone a la de fase contigua al bucle, tal como se mostró en la figura 4. En general, se observan diferencias muy pequeñas entre los valores simulados y medidos debido a las siguientes razones:

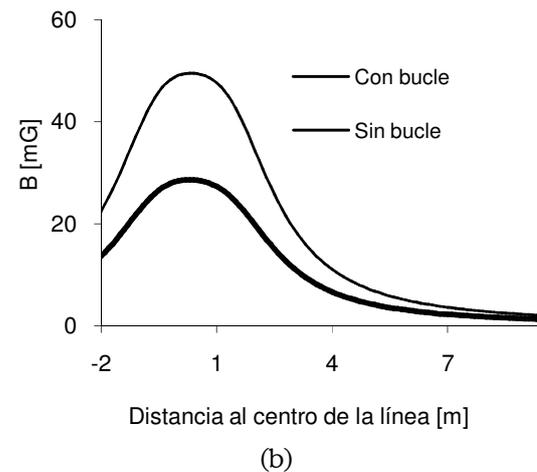
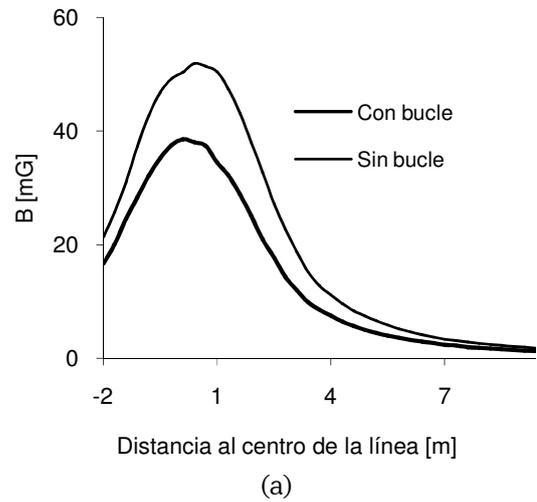


Figura 8. Atenuación de la densidad de campo magnético utilizando un conductor de bucle No. 2/0: (a) medida experimental, (b) simulación

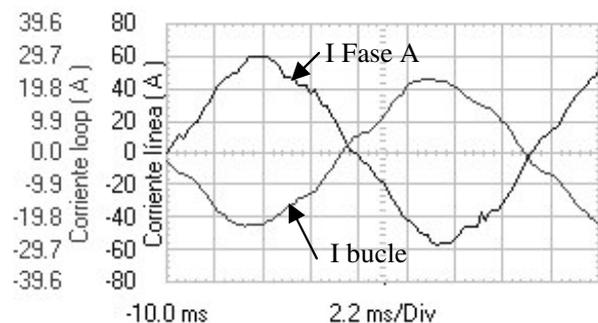


Figura 9. Forma de onda de corriente medida en la fase A y en el bucle



- La corriente real en el periodo de medición difiere ligeramente de la calculada, a causa de las variaciones de la carga en el tiempo.
- A los valores medidos no se le restó la densidad de campo magnético existente en el ambiente antes de realizar el montaje.
- Los conductores no son infinitamente largos en comparación con la separación entre ellos, como se supuso en el algoritmo de cálculo.
- El campo generado por las corrientes inducidas en el bucle se ve muy afectado por pequeñas ondulaciones del conductor de bucle. En el montaje fue muy difícil obtener una distancia constante entre los conductores de las fases y del bucle, esto se debe a las características físicas propias de los conductores, como la rigidez.

5. OPTIMIZACIÓN

Después de validar experimentalmente el algoritmo, se aplicó una técnica de optimización, con el fin de obtener las coordenadas del bucle que atenuaban al máximo B en un área de interés. La atenuación de dicho campo está directamente relacionada con la ubicación, área del bucle y el tipo de conductor. Antes de aplicar el proceso de optimización, se realizaron algunas simulaciones para

comprender cómo afectaban el ancho y la altura del bucle la densidad de campo magnético total. Los resultados de las simulaciones para el caso de la figura 6 con un bucle ubicado a 16 m y a 19 m de altura se muestran en las figuras 10 y 11. El porcentaje de mitigación de la densidad de campo magnético mostrado en dichas gráficas se define tal como fue presentado en Cruz, Izquierdo y Burgos (2002):

$$\text{Reducción de } B = \left(1 - \frac{|\vec{B}_{\text{linea}} + \vec{B}_{\text{loop}}|}{\vec{B}_{\text{linea}}} \right) \quad (13)$$

Donde \vec{B}_{linea} y \vec{B}_{loop} son las densidades de campo magnético de la LT y del bucle respectivamente.

Las figuras 10a y 11a muestran que, al incrementarse la altura del bucle, mejora la atenuación de B . Las figuras 10b y 11b muestran que, para cualquier distancia al centro de la línea, no se justificaría abrir el bucle más allá de 25 m. También se identifican claramente dos zonas, similares a la zona interior y exterior de la servidumbre, en las cuales se hacen evidentes los cambios producidos por el bucle. Por lo tanto, se deben conocer el área y la ubicación de la LT que se pretende apantallar, puesto que cada una tiene un comportamiento diferente frente al porcentaje de mitigación.

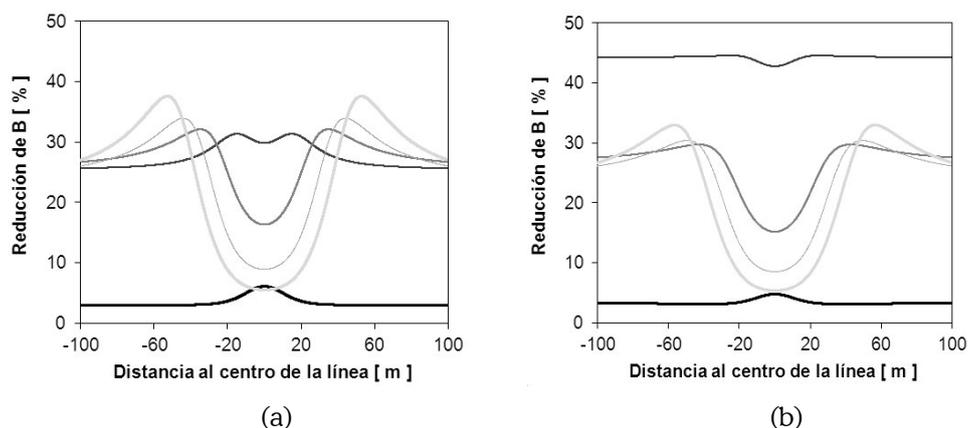


Figura 10. Atenuación de B a lo largo de la LT para diferentes aperturas de bucle: (a) bucle a 16 m de altura, (b) bucle a 19 m de altura.
— apertura 5 m, — apertura 15 m, — apertura 25 m, — apertura 35 m, — apertura 45 m

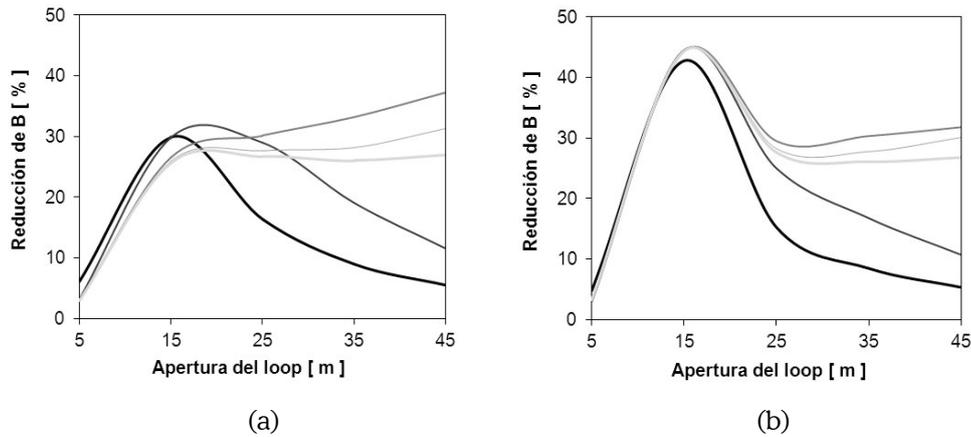


Figura 11. Atenuación de B respecto a la ubicación del bucle: (a) bucle a 16 m de altura, (b) bucle a 19 m de altura.

— a 0 m del centro, — a 25 m del centro, — a 50 m del centro, — a 75 m del centro, — a 100 m del centro

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, para aplicar el proceso de optimización se debe especificar una función objetivo que considere la zona de interés y, además, considerando que el porcentaje de mitigación se calcula punto a punto y que en muy pocas ocasiones se necesita una disminución en un punto específico, se hace necesario expresar dicha función teniendo en cuenta el promedio en un área determinada. Las funciones que definen estas dos zonas se tomaron iguales a las presentadas por Cruz, Izquierdo y Burgos (2002), definidas de la siguiente manera:

Función objetivo dentro de la zona de servidumbre:

$$F_1 = \frac{1}{2} (|B(k)| + |B(-k)|) \tag{14}$$

Función objetivo fuera de la zona de servidumbre:

$$F_2 = \frac{1}{2N} \sum_{x=k}^N (|B(x)| + |B(-x)|) \tag{15}$$

Donde F_1 y F_2 son la reducción de la densidad de campo magnético promedio dentro y fuera de la servidumbre respectivamente, B es la reducción de campo magnético calculada con la ecuación (13),

k es límite de la zona de servidumbre y N corresponde a la máxima distancia de cálculo fuera de la zona de servidumbre.

La nomenclatura de las anteriores ecuaciones se ilustra en la figura 12. En la práctica, $N \leq 100$ m dado que, para distancias mayores, el campo magnético producido por la LT es comparable con el campo producido por las corrientes de tierra.

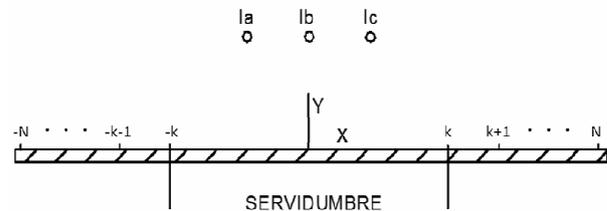


Figura 12. Posibles puntos para minimizar la densidad de campo magnético (Cruz, Izquierdo y Burgos, 2002)

El algoritmo genético que se utilizó en este trabajo fue desarrollado por Houck, Joines y Kay (1996), codificado en MATLAB como un toolbox, denominado “Toolbox GAOT”. Tiene GAOT los siguientes parámetros de entrada: matriz con los rangos de cada variable por optimizar, función (.m)



para optimizar, criterio de terminación, función de selección, mutación y cruzamiento. Los parámetros de salida son la matriz con la mejor población y la mejor solución. El proceso evolutivo puede concluir de dos formas: poniendo un límite que se alcance en la evaluación de la función objetivo, garantizando un error pequeño en la solución o terminando con un máximo de generaciones.

FMLOOP se programó como una función de MATLAB y como parámetro de entrada del algoritmo GAOT. La variable que se optimiza es el porcentaje de atenuación de campo magnético como se presentó en las ecuaciones (14) y (15). El cromosoma está constituido por la ubicación del bucle, es decir, la apertura X y la altura Y , con los siguientes límites de búsqueda: dentro de la zona de servidumbre $0 \leq X \leq k$, $5 \leq Y \leq d$; fuera de la zona de servidumbre $k \leq X \leq N$; $5 \leq Y \leq d$. Se utilizaron como operadores genéticos la combinación de cruzamiento y mutación, con el fin de mejorar la diversidad genética. Por último, como métodos de selección se tomaron el elitista y la ruleta.

Antes de realizar la optimización, se debe tener en cuenta que el bucle en la práctica no puede colocarse sin ninguna restricción física, puesto que en zonas de alta tensión es común que se presente efecto corona para algunas distancias entre la LT y un objeto conductor flotante, además, la altura mínima de la pantalla con respecto al suelo debe ser tal que no exista peligro de contacto con animales o personas; esta altura, siendo muy conservativos, se tomó de 5 m. En cuanto al efecto corona, se calcularon las distancias para evitarlo mediante la expresión (Cruz, 2000):

$$d = 0,1 + \frac{V_{ll}}{150} \quad (16)$$

Donde d es la distancia mínima a la que puede acercarse un objeto metálico a la LT sin producir efecto corona y V_{ll} es el voltaje línea-línea de la LT. Como ejemplo de aplicación, en la figura 13 se ilustra una configuración de una LT típica usada en Colombia. La descripción física de la LT es la siguiente:

- Tensión: 500 kV
- Corriente: 2500 A
- Longitud: 230 km
- Haz de 4 subconductores
- El radio de cada subconductor es de 25,16 mm
- Calculo de campo a 1 m del suelo
- Conductor de bucle 450 KCM, resistencia 0,131 ohm/km
- Distancia para generar corona: $d = 3,4$ m

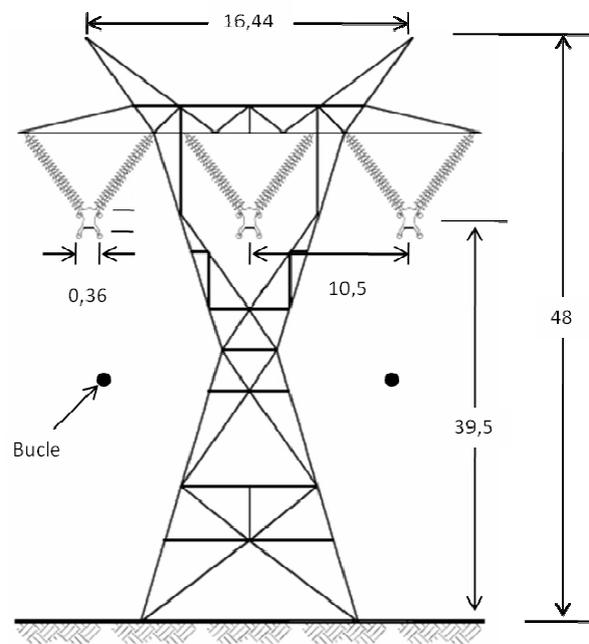


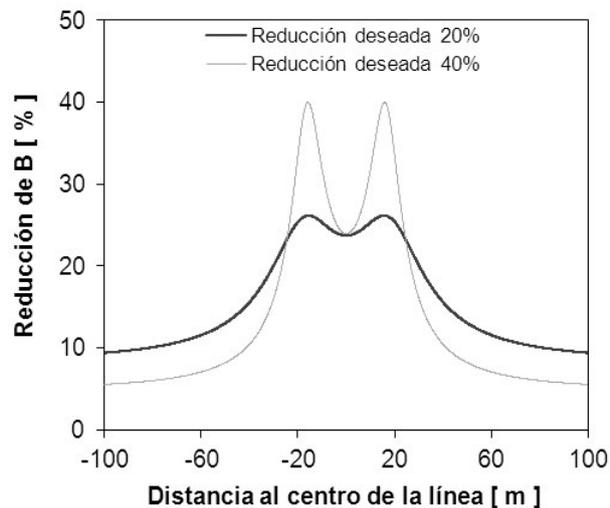
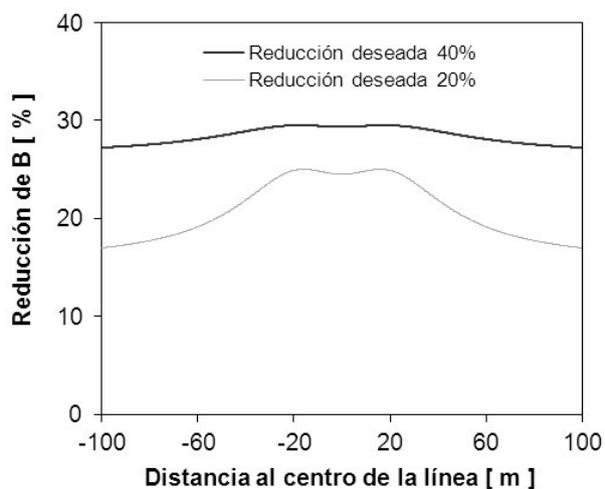
Figura 13. Configuración de la LT para proceso de optimización (dimensiones en metros)

Los resultados de los porcentajes de mitigación deseados, en promedio del 20 % y 40 %, dentro y fuera de la servidumbre y la ubicación óptima del bucle se presentan en la tabla 4 y en las figuras 14 y 15.

La tabla 4 y las figuras 14 y 15 muestran que las funciones objetivo tienen un buen comportamiento, pues tratan de alcanzar el porcentaje de mitigación deseado en las zonas especificadas, sin embargo, es importante aclarar que no se pueden lograr algunos porcentajes de mitigación, por ejemplo, 40 % de mitigación en la figura 15, dado que las restricciones físicas del sistema hacen imposible

Tabla 4. Resultados de la ubicación del bucle con algoritmos genéticos

Zona de mitigación	Mitigación de B deseada (%)	Ubicación del bucle [m]		Corriente inducida en bucle [A]
		X	Y	
Dentro de servidumbre	20	13,617	16,142	31,6
Dentro de servidumbre	40	16,437	7,437	21,83
Fuera de servidumbre	20	17,719	27,185	66,48
Fuera de servidumbre	40	14,064	36,000	144,1

**Figura 14.** Porcentaje de mitigación de B en la zona de servidumbre usando algoritmos genéticos**Figura 15.** Porcentaje de mitigación de B fuera de la zona de servidumbre usando algoritmos genéticos

una mayor reducción. Además, cuando se intenta atenuar la densidad de campo magnético dentro de la zona de servidumbre, los valores por fuera de dicha zona se reducen, y cuando se intenta atenuar la densidad de campo magnético fuera de la zona de servidumbre, los valores dentro de dicha zona se reducen. Por lo tanto, no se puede generalizar definiendo una posición del bucle global que determine la reducción óptima de la densidad de campo magnético.

6. CONCLUSIONES

El método presentado de cálculo de campo magnético incluyendo bucle pasivo es menos complejo comparado con otros propuestos en la literatura. El error máximo obtenido, cuando se conocen los datos del sistema, es menor del 5% y no requiere cálculos rigurosos para caracterizar el campo magnético tanto de la LT como del bucle.

El método de optimización mediante algoritmos genéticos determinó las coordenadas del bucle que atenuaban al máximo la densidad de campo magnético, considerando las restricciones reales de una LT. Los resultados permiten concluir que la ubicación del bucle depende de la zona que se desea apantallar (dentro de la zona de servidumbre o fuera de ella) y que la corriente inducida en el bucle es mayor cuando se apantalla fuera de la zona de servidumbre.

Los resultados experimentales y simulados muestran que el algoritmo implementado puede ser utilizado como una herramienta para análisis de



sensibilidad y cálculo de campo magnético de una LT con bucle y sin él; se concluye la validez del método y la factibilidad de aplicarlo a líneas de transmisión del sistema de potencia.

REFERENCIAS

- Backus, S.; Olsen, R. and Stearns, R. (1995). "Development and validation of software for predicting ELF magnetic fields near power lines". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, No. 3 (July), pp. 1525-1524.
- Cadavid, D. C.; Ramírez, D. A.; Lopera, F. y Correa, A. F. *Mitigación de campo magnético de líneas de transmisión utilizando láminas conductoras y lazos de cables cerrados*. Informe CODI, Universidad de Antioquia, mayo 2007.
- Colombia. Ministerio de Minas y Energía. *Reglamento técnico de instalaciones eléctricas-RETIE*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2008.
- Cruz, P. L. *Análisis, cálculo y técnicas de mitigación de campos magnéticos creados por líneas eléctricas de alta tensión*. Tesis doctoral. Escuela de Ingenieros de Sevilla (Sevilla, España). 2000.
- Cruz, P. and Izquierdo C. (2003). "Optimum passive shields for mitigation of power lines magnetic field". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.18, No. 14 (October), pp. 1357-1362.
- Cruz, P.; Izquierdo, C. and Burgos, M. *Optimal design of active shielding for power lines*. 14th PSCC, Sevilla, 24-28 session 24, paper 2, June 2002, pp.1-7.
- Filippopoulos, G. and Tsanakas, D. (2005). "Analytical calculation of the magnetic field produced by electric power lines". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, No. 2 (April), pp. 1474-1482.
- Houck, C. R.; Joines, J. A. and Kay, M. G. *Binary and real-valued simulation evolution for matlab*. 1996.
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) (1998). "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)". *Health Physics*, vol. 74, No. 4 (April), pp. 494-522.
- IEEE Magnetic Field Task Force (1998). "Magnetic fields from electric power lines: theory and comparison to measurements". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, No. 4 (October), pp. 2127-2136.
- Kaune, W. T. and Zaffanella, L. E. (1992). "Analysis of magnetic fields produced far from electric power lines". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, No. 4 (October), pp. 2082-2091.
- Memari, A. R. and Janischewskyj, W. (1996). "Mitigation of magnetic field near power lines". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, No. 3 (July), pp. 1577-1586.
- Memari, A. R. (2005). "Optimal calculation of impedance of an auxiliary loop to mitigate magnetic field of a transmission line". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, No. 2 (April), pp. 844-850.
- Moreno, O. G. *Programa para cálculo de campo magnético en líneas de transmisión: CAMAGIC*. Manual de aplicación, 1993.
- Mamishev, A. and Russell, B. (1995). "Measurement of magnetic fields in the direct proximity of power line conductors". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, No. 3 (July), pp. 1211-1216.
- NIEHS EMF-RAPID Program Staff. *NIEHS Report on health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields*. NIH Publication No. 99-4493. Research Triangle Park, NC: National Institute of Environmental Health Sciences, May 1999.
- Pettersson, P. (1996). "Principles in transmission line magnetic field reduction". *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol.11, No. 3 (July), pp. 1587-1592.
- Yamazaki, K.; Kawamoto, T. and Fujinami, H. (2000). "Requirements for power line magnetic field mitigation using a passive loop conductor". *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 15, No. 2 (April), pp. 646-651.