

MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO A FRECUENCIA EXTREMADAMENTE BAJA EN CIRCUITOS SECUNDARIOS

RESUMEN

Este documento pretende determinar el valor del campo magnético (CM) a frecuencia extremadamente baja (FEB) en líneas secundarias aéreas de un sistema de distribución urbano. Usando un modelo matemático es posible obtener resultados al implementar una simulación computacional así como también es posible obtener una aproximación al valor del CM generado por el total de las corrientes del circuito secundario. Este modelo matemático considera la contribución de las corrientes por neutro, dado el alto grado de desbalance del circuito, en estos sistemas residenciales

PALABRAS CLAVES: CM FEB, líneas, secundarias, distribución, simulación.

ABSTRACT

This paper pretends to determine the value of the magnetic field (MF) at extremely low frequency (ELF) in urban secondary airily distributed electrical lines. Using a math model it is possible to obtain results implementing a computer simulation as well as to obtain an approximation to the value of the MF generated by the total of the secondary currents circuit. This math model consider contribution of the neutral currents due to the high grate of the unbalance of the circuit on those systems.

KEYWORDS: MF ELF , lines, secondary, distributed, simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos abastecen la energía para satisfacer los requerimientos cotidianos en los centros urbanos, industriales y zonas rurales. Como consecuencia de la conducción de corrientes eléctricas existen CM asociados al fenómeno de desplazamiento de cargas, cuyos valores dependen de las corrientes en los conductores, de la disposición geométrica de los mismos y de la proximidad del observador a la fuente (en este caso, circuito secundario del sistema de distribución de energía). Estos campos han sido objeto de estudio desde diferentes enfoques: caracterización, medición, modelamiento y simulación, generalmente a niveles de transmisión, aunque se presentan algunos trabajos en el ámbito de sistemas de distribución [1,2] y también se han estudiado los efectos de los CM en sistemas biológicos y su normalización [3,4,5,6].

Pero en el ámbito nacional no se encuentra documentación sobre la caracterización de CM debido a circuitos secundarios y el aporte de corrientes por neutro a este campo, teniendo en cuenta que en muchas ocasiones las magnitudes de estas corrientes suelen ser similares o hasta mayores que las presentes en las fases[7] y se debe determinar por medio de simulaciones o mediciones si los niveles de CM están dentro de lo permitido por el *RETIE* en zonas públicas.

Para tal efecto, se esbozan de forma general los conceptos de electromagnetismo, son relacionados diferentes modelos matemáticos que se pueden emplear para una aproximación teórica de campos en lugares próximos a conductores que transportan corrientes

JAVIER IGNACIO. TORRES O.

Ingeniero Electricista
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
oscur@utp.edu.co

JOHANN ALEXANDER SALAZAR

Ingeniero Electricista
Universidad Tecnológica de Pereira
johann@ohm.utp.edu.co

eléctricas, teniendo en cuenta el fenómeno del retorno de corrientes a través del conductor neutro, la manera como son calculadas y la contribución que estas corrientes hacen a la inducción magnética B resultante. Como una aplicación práctica se presenta un programa para realizar cálculos del campo magnético, en el cual se considera la presencia del conductor neutro.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Campo Electromagnético CEM : Se denomina campo a la zona del espacio donde se manifiesta una fuerza. Siendo el campo electromagnético (CEM) la zona donde las fuerzas electromagnéticas (EM) se presentan, y si hay presencia de partículas eléctricas estas se pueden ver afectadas por las fuerzas citadas. El CEM se puede describir por medio de cantidades escalares, vectoriales o tensoriales.

2.1.1 Ondas Electromagnéticas. El movimiento de cargas eléctricas en un conductor origina ondas de campos magnético y eléctrico (denominadas ondas electromagnéticas) que se propagan a través del espacio vacío a la velocidad de la luz ($C = 300000 \text{ km/s}$), estas ondas radiadas llevan asociadas una energía electromagnética que puede ser captada por un receptor (seres vivos, antena de televisión, antenas incorporadas en teléfonos móviles, etc).

Al igual que cualquier otro fenómeno ondulatorio la radiación electromagnética se puede caracterizar por su

longitud de onda (λ) y su frecuencia (f), mediante la relación:

$$C = f \lambda \quad (1)$$

La frecuencia del campo electromagnético es igual que la de la corriente que lo genera, en este caso, FEB (60 Hz), con sus correspondientes armónicos.

2.1.2 Intensidad de Campo Magnético (\vec{H}): Es una cantidad vectorial que junto con el vector de inducción magnética \vec{B} , determina un campo magnético en cualquier punto del espacio, \vec{H} solo depende de la corriente y de la distancia con respecto a la fuente y no del medio. sus unidades en el sistema internacional son el Ampère por metro [A/m], y se expresa según la ecuación 2.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{L} = I \quad (2)$$

La anterior ecuación es la ley de Ampère, en la que se puede estimar el campo conociendo el valor de la corriente y el diferencial de longitud dL .

2.1.3 Flujo Magnético y Densidad de Flujo Magnético. En el espacio libre se define la densidad de flujo magnético B según la ecuación 3.

$$B = \mu_0 H \quad (3)$$

Donde B se expresa en Tesla (T) según el sistema internacional de medida (SI), o también se utiliza el Gauss (G), donde 1 T es equivalente a 10000 G. La constante μ_0 no es adimensional y tiene valor específico en el espacio libre, dado en Henrys por metro (H/m) de:

$$\mu = 4\pi * 10^{-7} \text{ H/m} \quad (4)$$

El nombre dado a μ_0 es permeabilidad del espacio libre.

2.2 Campos Cercanos y Lejanos. El campo cercano es la zona circundante al punto de emisión de la onda, en la cual la distancia entre el observador y la fuente es menor que una longitud de onda. En esta zona los campos eléctricos y magnéticos se pueden desacoplar y tratar separadamente[8] y los campos pueden ser determinados, pero su radiación no puede ser cuantificada. Luego, fuera del perímetro del campo cercano, está el campo lejano.

2.3 CM FEB: Según la ecuación (1), la longitud de onda del CEM FEB es de 5.000 km lo cual nos ubica en la región de campo cercano, por tanto podemos analizar CM con independencia del Campo eléctrico, y estos campos no son radiantes. Las ondas de CM FEB tienen características separadas y no radiantes.

La fuente de un campo magnético es el movimiento de cargas eléctricas también llamado flujo de corriente. Un conductor que lleva una corriente eléctrica genera un campo magnético a su alrededor.

Considerando el campo magnético en el interior del conductor como lineal, la ley de Ampère establece la ecuación 5, para el cálculo de la inducción magnética debida a la circulación de corriente por un conductor. Donde \vec{B} , es representado por un vector tangente a un círculo de radio R centrado en un eje conductor, e I es la intensidad de corriente en Ampère.

$$B = \mu_0 I / 2\pi R \quad (5)$$

Cuando se presentan varios conductores, el campo total se calcula aplicando el principio de superposición a los campos parciales producidos por cada conductor, considerando sus respectivas direcciones y fases.

Un cálculo preciso requiere considerar el efecto del suelo como imágenes de los conductores reflejados por este [2] y el aporte del conductor neutro.

Los CM debidos a líneas de distribución secundarias son típicamente más altos que los de alimentadores primarios, dado que las corrientes en estos últimos son mayores.

2.4 Sistemas de Distribución de Energía El sistema de distribución de energía eléctrica es aquella parte del sistema de potencia entre las subestaciones de distribución y la acometida a los consumidores. Los componentes del sistema son:

Sistema primario, transformadores de distribución, circuitos secundarios y circuitos de iluminación.

2.4.1. Circuitos Secundarios. Los circuitos secundarios con alimentación monofásica operan a niveles de tensión de 240/120 V y en redes trifásicas residenciales la tensión de servicio nominal es de 208/120 V. La disposición de los conductores en los circuitos tienen una configuración radial, empleándose una red trifilar si el transformador es monofásico y tetrafilar si el transformador es trifásico. Los circuitos con separaciones entre conductores de 10 cm. El conductor neutro siempre va en la parte superior.

2.5 Corrientes de retorno por neutro.

Las cargas desbalanceadas y el contenido de armónicos (debido a la naturaleza no lineal de estas) son las causas principales para que se presente circulación de corriente por el conductor neutro de un sistema de distribución, estas corrientes, como ya se expuso pueden tomar valores tan significativos que incluso pueden superar la corriente que circula por alguna de las fases[7], causando, además de calentamiento, pérdidas y graves daños en los sistemas, aumento del CM debido al circuito secundario. En sistemas eléctricos de distribución de energía (trifásicos y monofásicos) los desbalances y la existencia de terceros armónicos inciden directamente en la

presencia de corriente a través del conductor neutro del sistema.

3. MODELOS MATEMÁTICOS DE CAMPO MAGNÉTICO EN LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN.

En el presente aparte se expone el cálculo de la corriente por neutro del sistema secundario y un modelo matemático para el cálculo de campos magnéticos en estos circuitos, basado en modelos preestablecidos para líneas de transmisión [9,10], estos modelos se pueden considerar para otros niveles del sistema eléctrico debido a que las características de las variables: corriente y campo magnético solo difieren en la magnitud.

3.1 Cálculo de la corriente por el conductor neutro.

Conociendo las corrientes armónicas de las tres fases con sus respectivos ángulos, el aporte de cada armónico a la corriente en el neutro puede ser calculado con las ecuaciones generales (independientes del grado de desbalance y del tipo de carga) que se relacionan a continuación[11]:

$$I_{N,i} = I_{r,i} + I_{i,i} \quad (6)$$

$$I_{r,i} = I_{A,i} \cos(\Phi_{A,i}) + I_{B,i} \cos(\Phi_{B,i}) + I_{C,i} \cos(\Phi_{C,i}) \quad (7)$$

$$I_{i,i} = I_{A,i} \sin(\Phi_{A,i}) + I_{B,i} \sin(\Phi_{B,i}) + I_{C,i} \sin(\Phi_{C,i}) \quad (8)$$

Donde $I_{r,i}$ e $I_{i,i}$ son los componentes real e imaginario de la corriente armónica de orden i en el conductor neutro, $I_{A,i}(t)$, $I_{B,i}(t)$, $I_{C,i}(t)$ es el valor rms de la corriente armónica de orden i en las fases A, B, C respectivamente $\Phi_{A,i}$, $\Phi_{B,i}$, $\Phi_{C,i}$, son los ángulos de fase de las corrientes armónicas de orden i de los conductores A, B, C, respectivamente.

3.2 Método general para medición de CM en circuitos secundarios.

La intensidad de campo magnético de un circuito secundario es calculada usando un análisis bidimensional, asumiendo conductores paralelos sobre el plano de la tierra y empleando un sistema de coordenadas cartesianas (rectangulares). El eje z es paralelo a los conductores, la intensidad de campo magnético H_{ij} , en el punto (x_i, y_j) a una distancia r_{ij} de un conductor con una corriente I_i , tiene una amplitud[9]:

$$H_{ij} = \frac{I_i}{2\pi * r_{ij}} \quad (9)$$

En notación vectorial:

$$\vec{H}_{ji} = \frac{\vec{I}_i \times \vec{r}_{ji}}{2\pi * r_{ij}^2} = \frac{I_i}{2\pi * r_{ij}} \vec{\varphi}_{ij} \quad (10)$$

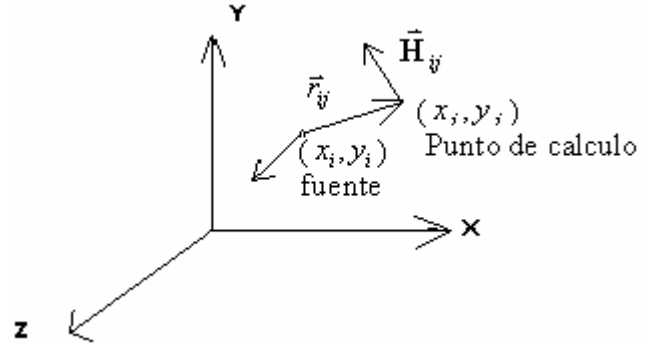


Figura 1 Sistema de coordenadas para el cálculo de campo magnético.

Donde $\vec{\varphi}_{ij}$ es el vector unitario en la dirección del producto vectorial del vector corriente y el segmento \vec{r}_{ij} .

El vector unitario es igual a:

$$\vec{\varphi}_{ij} = -\frac{y_i - y_j}{r_{ij}} \vec{\mu}_x + \frac{x_i - x_j}{r_{ij}} \vec{\mu}_y \quad (11)$$

Donde $\vec{\mu}_x$, $\vec{\mu}_y$ son los vectores unitarios en la dirección horizontal y vertical respectivamente.

La intensidad de campo magnético total en un punto del espacio, es la suma de las contribuciones del campo magnético debido a todas las corrientes por cada conductor, incluyendo el neutro.

$$\vec{H}_j = \sum_i^n \frac{I_i}{2\pi * r_{ij}} \vec{\varphi}_{ij} \quad (12)$$

Usando la ecuación 12, la intensidad de campo magnético total de un circuito en el punto (x,y) es obtenida sumando la contribución debida a las corrientes en los cuatro conductores, el resultado es un número complejo que puede ser caracterizado por sus componentes vectoriales a lo largo de los ejes x y y.

En ciertos casos la intensidad de campo magnético en proximidad a circuitos trifásicos balanceados (alimentadores primarios) puede ser calculada considerando las corrientes en el conductor y los cables de tierra sin considerar las corrientes por suelo, aproximación que se puede hacer debido a que estas valoraciones se hacen en lugares cercanos a la línea, para las mediciones la recomendación que expresa la norma es a un metro sobre el nivel del piso[12], para el lugar de cálculo la profundidad a la que se encuentra la corriente por tierra hace que su aporte al campo magnético del sistema sea despreciable, precisamente porque este decrece con el inverso del cuadrado de la distancia.

Descrito como vectores por parte real e imaginaria:

$$\vec{H}_r = H_{x,r} \vec{\mu}_x + H_{y,r} \vec{\mu}_y \quad (13)$$

$$\vec{H}_i = H_{x,i} \vec{\mu}_x + H_{y,i} \vec{\mu}_y \quad (14)$$

La intensidad de campo magnético producido por las corrientes en el secundario del sistema es:

$$\vec{H}_S = \vec{H}_{s,r} + \vec{H}_{s,i} \quad (15)$$

Donde $\vec{H}_{s,r}$ es la parte real y $\vec{H}_{s,i}$ es la parte imaginaria del vector intensidad de campo magnético.

Ahora la densidad de flujo magnético debido a las corrientes en el sistema secundario según la ecuación 4 es:

$$B_s = \mu_0 H_s \quad (16)$$

Este modelo obvia el valor de la resistividad de la tierra, por tener este un aporte muy pequeño al resultado de la intensidad de flujo magnético B_s .

La expresión obtenida para el campo magnético total del circuito secundario debido a todos los conductores se trabajó mediante el uso del principio de superposición aplicado a campos magnéticos. Este se presenta como una ecuación que unifica el aporte de cada fuente (tres fases y neutro) estudiada de manera independiente.

Para la validación del modelo matemático y del programa se usó la metodología presentada en [13]. Se alimentó el programa implementado con los valores de corriente contenidos en [9] y por último se compararon los resultados arrojados con los contenidos en [9], presentando igualdad en los resultados.

4. PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS EN CIRCUITOS SECUNDARIOS.

En el estudio del comportamiento del CEM y sus posibles efectos en seres vivos, se deben estimar las magnitudes a las cuales está expuesto el público general en zonas urbanas, ya que un elevado porcentaje de la población Colombiana se encuentra en esta zona. Una de las posibilidades para tener estimativos de estos valores es la simulación de los campos de inducción magnética.

En este aparte se presenta la implementación en Matlab del modelo desarrollado para estimar teóricamente valores de campo magnético debidos a circuitos secundarios en sistemas de distribución de energía eléctrica a FEB, sin tener en cuenta el aporte por los armónicos.

El perfil que obtenido corresponde a la zona frontal de una vivienda, espacio en el cual la circulación de corriente por el circuito secundario es constante solo entre las dos acometidas contiguas (10 m aproximadamente). Este programa fue creado usando la interfaz gráfica, graphic user interface development environment (GUIDE) de Matlab. Implementándose el modelo matemático expuesto en el apartado 3.2. Las siglas de GUIDE en español significan Interface de usuario para desarrollo de ambiente, que permite crear de manera interactiva cada elemento que hace parte de una ventana de usuario en la que se manipulan datos de entrada y se

puede visualizar los resultados en cuadros de diálogo y gráficos.

En la figura 2 se muestra la ventana de trabajo del programa realizado mediante el GUIDE de Matlab, para simulación de flujo magnético generado por las corrientes de la red secundaria del sistema de distribución de energía eléctrica.

Para generar los resultados, el programa requiere como datos de entrada los valores de las corrientes por cada una de las fases y del neutro, además la ubicación de los conductores y la localización del punto de medición eligiéndose un origen de coordenadas arbitrario, pues el algoritmo calcula la posición de los conductores referenciadas a la ubicación del punto que se seleccione para el cálculo. En la ventana de trabajo se presentan los valores del campo magnético debido al sistema secundario completo y el aporte de la corriente por el conductor neutro al campo magnético total del sistema. Adicionalmente se muestra la gráfica de densidad de flujo magnético B en (μT) contra distancia en metros (m) con el comportamiento del campo.

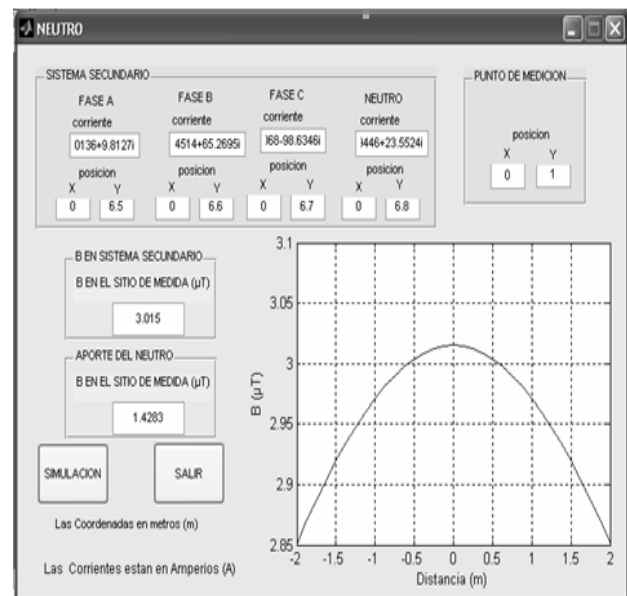


Figura 2 Ventana de trabajo del programa para la simulación del campo magnético en el sistema secundario de distribución.

El programa realiza un proceso iterativo para generar el gráfico haciéndose un desplazamiento de dos metros a cada lado del punto seleccionado a lo largo del eje X. En el ejemplo que se presenta se eligió el origen debajo de los conductores a la altura del piso.

5. Resultados de la simulación. Las simulaciones fueron realizadas, alimentando el programa con corrientes obtenidas por medio del analizador de calidad de energía Topas a la salida del transformador de distribución, donde las corrientes son las más altas del circuito secundario (ver tabla 1) la medición 1 se realizó

en una biblioteca y la medición 2 se realizo en una clínica. Estas simulaciones son las más representativas que se realizaron, en cuanto a desbalance de corrientes del circuito y nivel de flujo de campo magnético.

Corriente	Medición 1	Medición 2
I_A (A)	35.01+9.81 i	263.02-140.27 i
I_B (A)	-62.45+65.27 i	-16.301+313.14 i
I_C (A)	-9.51-98.63 i	-223.36-167.27 i
I_N (A)	36.94+23.55 i	-23.36-5.59 i

Tabla 1. Valores de corrientes de circuito secundario

Las posiciones de interés se presentan en las tablas 2 y 3. En la tabla 2 se consignan los resultados a un metro del suelo y en dirección a la edificación, posicionándose dentro de ella. En la tabla 3 se presentan resultados a dos metro en X y en Y subiendo por la orilla de la edificación, hasta cuatro metros.

Las posiciones de la tabla 2 y 3 corresponden a la zona de seguridad que plantea el *RETIE*, para niveles de *CM* en áreas residenciales[14]

Simulación 1				Simulación 1			
Posi X (m)	Posi Y (m)	B (μT)	B _N (μT)	Posi X (m)	Posi Y (m)	B (μT)	B _N (μT)
0	1	3.01	1.43	0	1	1.99	0.78
1	1	2.97	1.35	1	1	1.95	0.74
2	1	2.85	1.24	2	1	1.85	0.68
3	1	2.68	1.14	3	1	1.71	0.63

Tabla 2. Valores de *CM* a un metro del suelo

Simulación 1				Simulación 1			
Posi X (m)	Posi Y (m)	B (μT)	B _N (μT)	PosiX (m)	Posi Y (m)	B (μT)	B _N (μT)
2	1	2.85	1.24	2	1	1.85	0.68
2	2	3.75	1.40	2	2	2.24	0.77
2	3	4.50	1.59	2	3	2.79	0.87
2	4	5.30	1.79	2	4	3.60	0.98

Tabla 3. Valores de *CM* a orilla de la vivienda, con diferentes alturas

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El campo magnético debido a los circuitos secundarios, con los que se realizó la simulación están por debajo de los límites recomendados por el *RETIE* en el artículo 14 (0.5 mT) [8] y por el ICNIRP (0.1 mT) [4].

Los resultados preliminares de las simulaciones realizadas, plantean una aparente proporcionalidad directa entre el valor de la corriente por neutro y la magnitud de la densidad de flujo magnético resultante.

Se deben replantear los criterios de diseño para los conductores de neutro en circuitos secundarios, dada la presencia de cargas no lineales, buscando reducir los efectos de la corriente circulante por en conductor neutro minimizando la contaminación electromagnética.

Se deben proyectar simulaciones y/o mediciones para el sistema de distribución completo, teniendo en cuenta el sistema de iluminación público y los trafos.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] APONTE, Guillermo, CADAVID, Héctor y ESCOBAR, Adolfo. Medición y modelamiento de Campos magnéticos de baja frecuencia en ambientes residenciales. Simposio Internacional sobre calidad de la energía eléctrica. SICEL 2001. Colombia 2001.

[2] Vinh T.; Jones T. L. y Shin, C. H.. Magnetic Fields Near Overhead Distribution Lines Measurements and Estimating technique. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 6 No 2.Abril 1991.pag 912-919.

[3] LLAMOSA Luis. Y TORRES Javier. Fundamentos para una propuesta de norma Técnica ambiental en radiaciones electromagnéticas no ionizantes para Colombia. Scientia Et Tehcnica.año IX No 22 octubre de 2003.p 143-148

[4]ICNIRP. Recomendaciones para limitar la exposición a *CEM* (hasta 300 GHz) 1998

[5]CIDET. Propuesta de norma colombiana sobre campos electromagnéticos y salud, diciembre de 1998.

[6]Prenorma europea sobre radiaciones electromagnéticas ENV 50166-1 CENELEC Febrero 1995.

[7] Cadavid. R y Gallego. L. Armónicos y problemas de “POWER QUALITY” en el conductor de neutro en sistemas trifásicos. Scientia Et Tehcnica. año IX No 22 octubre de 2003.p 19-24

[8] VIDAURRE, A Y JIMÉNEZ, M. Fundamentos de ingeniería II, Valencia 1996,p. 297.

[9] D.W,Deno and L.E. Zaffanella. Transmission Line Reference Book 354 KV and above / second edition. Palo Alto California: Electric Power Research Institute.1982.Pags 341-343.

[10] KAUNE, W. T; ZAFFANELLA, L. E. IEEE, Analysis of Magnetic Fields Produced Far from Electric Power Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 7 No 4,pag 2082-2091, octubre 1992.

[11] DESMET, J., et al. Analysis of the neutral conductor current in a three phase supplied network with non-linear single phase loads, Electric machines and drives conference, 2000. IEMDC 2001. IEEE International, 2001, pp. 448-453.

[12] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE) Standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from ac power lines. USA: IEEE Std 644-1994

[13] OLSEN, Robert; BACKUS, Samuel L; STEARNS, Richard D. Development and Validation of Software for Predicting ELF Magnetic Fields Near Power Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 10 No 3 Julio 1995.

[14] Reglamento Técnico Para Instalaciones Eléctricas. (*RETIE*). Ministerio de Minas y Energía. abril de 2004