

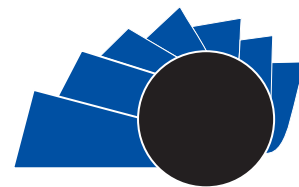


UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Visión Electrónica

Más que un estado sólido

<https://doi.org/10.14483/issn.2248-4728>



VISIÓN ELECTRONICA

Visión de Caso

Campos electromagnéticos generados por líneas de transmisión en áreas urbanas

Electromagnetic fields generated by transmission lines in urban areas.

Jaider Hernando Cabrera Sáenz¹, John Fredy Escobar Rincón², César Alexander Chacón Cardona³

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historia del artículo

Enviado: 17/12/2017

Recibido: 07/02/2018

Aceptado: 02/06/2018

Palabras clave:

Alta Tensión,
Campo electromagnético,
Compatibilidad electromagnética,
Línea de transmisión,
Método de las imágenes,
Zona de servidumbre.

Keywords:

High voltage,
Electromagnetic field,
Electromagnetic compatibility,
Transmission line,
Imaging method,
Zone of servitude.

RESUMEN

El presente artículo de investigación tiene como objetivo el estudio e interpretación del campo eléctrico y magnético generado por las líneas de distribución de energía eléctrica en alto voltaje para el nivel de 115 kV a una frecuencia industrial de 60 Hz, como consecuencia de la expansión de las redes eléctricas en una zona urbana. El estudio consiste en comparar los valores físicos del fenómeno medido en el área de estudio. Como método de solución para el análisis teórico se utilizó el método numérico de las imágenes; para el modelado y gráfico de los campos se utilizó la herramienta computacional (COMSOL Multiphysics®) evaluando aceptablemente la influencia de la radiación del campo electromagnético en el cuerpo humano.

ABSTRACT:

This research project has as main focus the study and interpretation of electrical and magnetic field generated by lines of distribution of electrical energy in high voltage for the level of 115kV to an industrial frequency of 60 Hz as a consequence of the expansion of electrical networks in an urban zone. The study consists in comparing physical values of the phenomenon measured in the study area. As a numerical method of solution for the theoretical analysis the (numerical method of the images) was used, for the modeling and graphic of the fields the Computational tool (COMSOL Multiphysics®) was used to evaluate the influence of radiation of electromagnetic field in the human body.

¹ Tecnólogo En Electricidad, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Lugar de trabajo: Serticol. Correo electrónico: jcabrera@serticol.com.co.

² Tecnólogo En Electricidad, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: jfescobarr@correo.udistrital.edu.co.

³ Físico, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. MSc. En Física, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Ph.D. En Ciencias Físicas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: cachacon@udistrital.edu.co.

Citar este artículo como: J. H. Cabrera-Sáenz, J. F. Escobar-Rincón y C. A. Chacón-Cardona, "Campos electromagnéticos generados por líneas de transmisión en áreas urbanas", *Visión electrónica, algo más que un estado sólido*, vol. 12, no. 1, Edición especial, enero-junio 2018. DOI revista: <https://doi.org/10.14483/issn.2248-4728>.

1. Introducción

En los diferentes procesos de la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica existe un punto importante al momento de suplir la demanda y es el de contar con la infraestructura necesaria para suplir las necesidades que se presenten en cada proceso, [1].

La presencia de redes de transmisión y distribución de energía situadas a lo largo de la extensión territorial del país en lo que se conoce como el SIN (Sistema de Interconexión Nacional) está determinada de acuerdo a puntos de referencia del sistema energético (centrales generadoras de energía, subestaciones de transformación de nivel de tensión y zonas de distribución y/o consumo) en áreas rurales y urbanas, [2].

En Colombia, y particularmente en Bogotá, existen varios sectores de la ciudad que presentan un crecimiento anormal y desordenado por la práctica de la invasión ilegal de terrenos en zonas no aptas para la urbanización, sin títulos de propiedad, con carencias en la prestación de servicios públicos y en zonas de alto riesgo alrededor de las grandes ciudades, [3].

Antes de iniciar una construcción se espera la elaboración de una norma para el operador de red con la cual se pueda controlar más los procesos donde intervengan zonas con espacios de servidumbre, es por eso que surge la necesidad de complementar las normas de cálculo y diseño de sistemas de distribución; pormenorizando en forma clara y precisa las especificaciones técnicas dadas en dicha norma, [4].

En este proyecto de investigación se seleccionó una zona de estudio demarcada fuertemente por la intervención de las redes de distribución que contienen líneas de 115Kv, entre la Subestación Salitre y Subestación Suba (Bogotá), indicado en la figura 1, más específicamente en la obra ubicada en la dirección Carrera 80 #150 – 32, en el barrio Casablanca, limitando con el parque de los nevados en la localidad de Suba, como se aprecia en la imagen 3, se realizan construcciones, con licencias y permisos aprobados sin tener en cuenta las incidencias de las redes eléctricas situadas en este lugar.



Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio – Bogotá. Fuente: elaboración propia.

2. Metodología

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell, para el fenómeno electromagnético se procede a describir analíticamente el campo electromagnético generado por una línea de transmisión de alta tensión de 115kV, [5].

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad 1) \quad \nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad 2) \quad \nabla \times \vec{D} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad 4)$$

2.1. Métodos de cálculo de campos electrostáticos.

Se usa la **Simulación De Cargas -Método De Las Imágenes-**, generándose una superficie donde se establecen cargas ficticias en el campo electrostático: entre más cargas se mejora la exactitud, [4], figuras 2 y 3.

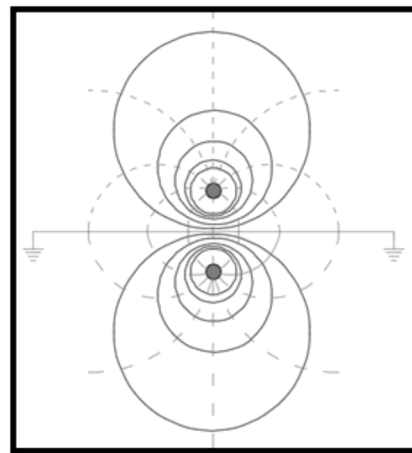


Figura 2. Gráfico visualización aplicación método de las imágenes para una carga. Fuente: elaboración propia.

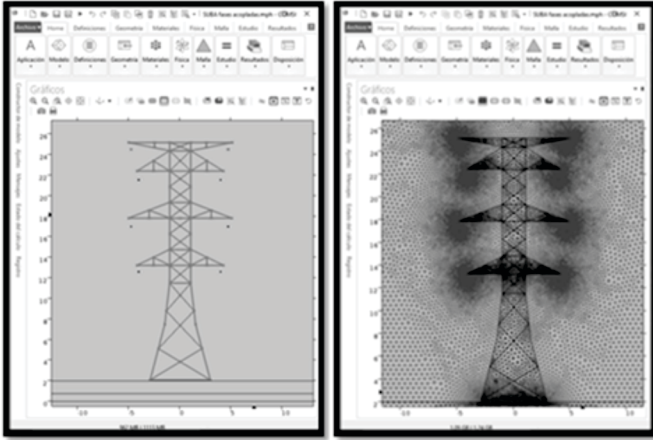


Figura 3. Configuración del software COMSOL Multiphysics para estructura de red eléctrica.
Fuente: elaboración propia.

2.2. Método general para líneas de transmisión

Para el cálculo campo eléctrico en la línea de transmisión se debe asumir que no hay carga libre en el espacio y este será calculado en un punto, N , de coordenadas $X_N Y_N$, en el espacio. El campo generado en el conductor a y a su imagen dentro del espacio se formula en la siguiente ecuación (5).

$$\vec{E}_a = \vec{E}_{x,a} \vec{u}_x + \vec{E}_{y,a} \vec{u}_y$$

Los vectores unitarios \vec{u}_x y \vec{u}_y están situados en los ejes horizontales y verticales, así. $\vec{E}_{x,a}$ y $\vec{E}_{y,a}$ corresponden a la ecuación (6) y (7).

$$\vec{E}_{x,a} = \frac{(q_{r,a} + j q_{i,a})(x_N - x_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a - y_N)^2]} - \frac{(q_{r,a} + j q_{i,a})(x_N - x_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a + y_N)^2]} \quad (6)$$

$$\vec{E}_{y,a} = \frac{(q_{r,a} + j q_{i,a})(y_N - y_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a - y_N)^2]} - \frac{(q_{r,a} + j q_{i,a})(y_N - y_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a + y_N)^2]} \quad (7)$$

El campo eléctrico en sus componentes \vec{E}_x y \vec{E}_y se calculó tomando todas las contribuciones de la línea, por último, el campo eléctrico para una línea de transmisión como vector con su parte real e imaginaria, está dado en la ecuación (8) y (9):

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{rx} \vec{u}_x + \vec{E}_{ry} \vec{u}_y \quad (8)$$

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{ix} \vec{u}_x + \vec{E}_{iy} \vec{u}_y \quad (9)$$

Para el cálculo campo magnético en la línea de transmisión, la intensidad de campo magnético

total en un punto del espacio es la suma de las contribuciones del campo magnético, según ecuación (10) debido a todas las corrientes por cada conductor, incluyendo el neutro.

$$\vec{H}_j = \sum_i^n \frac{I_i}{2\pi r_{ij}} \vec{\Phi}_{ij} \quad (10)$$

La densidad de flujo magnético es expresada por la ecuación (11)

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (11)$$

El campo magnético se ve afectado por la presencia de corrientes de retorno de la tierra, y más notable a largas distancias de la línea transmisión, fue necesario las ecuaciones de Carson porque consideran este caso y está expresado en la siguiente ecuación (12)

$$\vec{H}_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi r_{ij}} \vec{\Phi}_{ij} - \frac{I_i}{2\pi r'_{ij}} \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{2}{r r'_{ij}} \right)^4 \right] \vec{\Phi}'_{ij} \quad (12)$$

El campo magnético y sus componentes se calcularon tomando todas las contribuciones de corriente en la línea, y también se puede expresar como vector con su parte real e imaginaria, está dado en la ecuación (13) y (14):

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

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

2.3. Recomendaciones y restricciones básicas establecidas por organismos nacionales e internacionales.

A nivel global, los organismos encargados en establecer los niveles de exposición de a campos electromagnéticos son: "Institute of Electrical and Electronics Engineers" (IEEE) y la "International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection" (ICNIRP), [6]. También a nivel nacional se encuentra el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) que se basa en condiciones de la Norma técnica colombiana (NTC) [7]; para personas que estén expuestas a campos electromagnéticos, no deben superar los valores indicados en la tabla 1, [8].

TIPO DE EXPOSICIÓN	INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO [Kv/m]	DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO [μT]
EXP. OCUPACIONAL UN DÍA DE TRABAJO (8 HORAS)	8,3	1000
EXP. PÚBLICO EN GENERAL (8 HORAS CONTINUOS)	4,16	200

Para desarrollar de manera óptima los valores en la zona de estudio se realizó un previo trabajo para determinar el valor nominal de parámetros eléctricos en los que está operando la línea de transmisión

seleccionada, [9]. Estos se relacionan en la tabla 2, además de la ficha técnica, donde se encontraron valores importantes para ejecutar el estudio, tabla 3, [10].

TENSIÓN [kV]	115
CORRIENTE [A]	250
TEMPERATURA AMBIENTE [C°]	18
TEMPERATURA DE REFERENCIA [C°]	20

Tabla 2. Característica De La Línea De Transmisión De 115kv en operación (16-mar-06). Fuente: elaboración propia.

Nombre	Calibre	N° hilos		Área sección de Aluminio	
		Aluminio	Acero	mm ²	Kcmil
Peacock	605 kcmil	24	7	306,7	605
	Masa nominal (kg)			Capacidad de corriente (A)	Resistencia nominal a 20°C (Ω /km)
	Aluminio	Acero	total		
	850,5	310,7	1161	760	0,094

Tabla 3. Ficha técnica para cable conductor – línea 115 kV, doble circuito [11].

3. Resultados

Además de los valores nominales relacionados a la estructura y al cable conductor, se requieren otros valores para ingresar al software COMSOL Multiphysics, para garantizar una mayor precisión en el momento de la simulación, estos están relacionados al medio en el que se propaga las ondas del campo electromagnético y datos relacionados con la conductividad eléctrica por ejemplo el concreto, estos datos se presentan en la tabla 4.

MATERIAL	PERMEABILIDAD RELATIVA	PERMITIVIDAD RELATIVA	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA [S/m]
Aire	1	1	0
Suelo	1	20 ⁶	0,002
Conductor Al. (aleación 350)	1	1,13x10 ¹⁶	3,78x10 ⁷
Concreto	1	1	0,0002

Tabla 4. Características materiales relacionadas en zona de estudio. Fuente: elaboración propia

Se emplea MATLAB® para simular el comportamiento del perfil de campo eléctrico y magnético, figura 4, ya que para determinar la propagación de cada uno de los campos se hace más práctico; esto permite generar un parámetro de interpretación del fenómeno, para determinar cómo sería la respuesta en el estudio, [12].

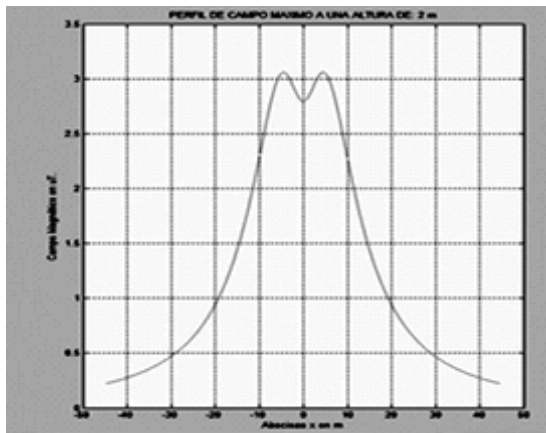
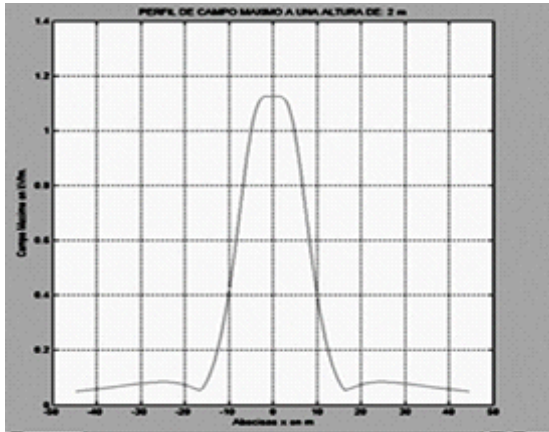


Figura 4. Perfil de campo eléctrico y magnético. Fuente: elaboración propia

En cuanto a la Geometría del modelo, utilizando COMSOL, se generan las figuras 5-12

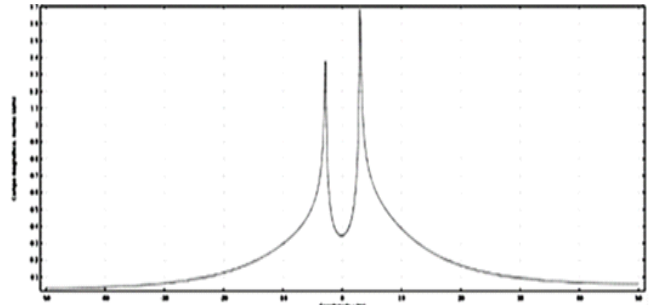
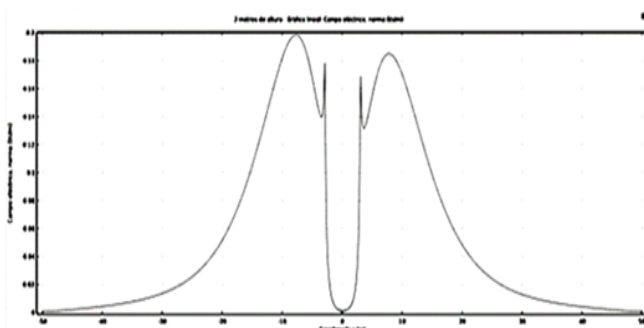


Figura 5. Campo eléctrico y magnético a 2 metros de altura. Fuente: elaboración propia

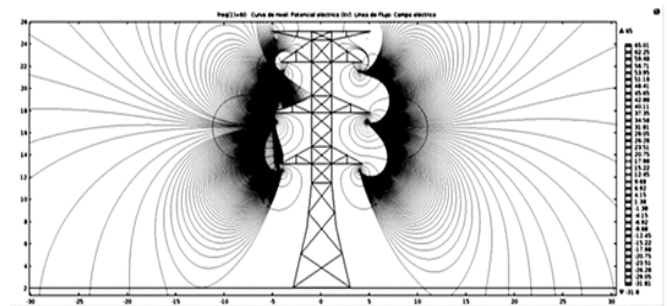


Figura 6. Curva de Nivel para Campo eléctrico. Fuente: elaboración propia

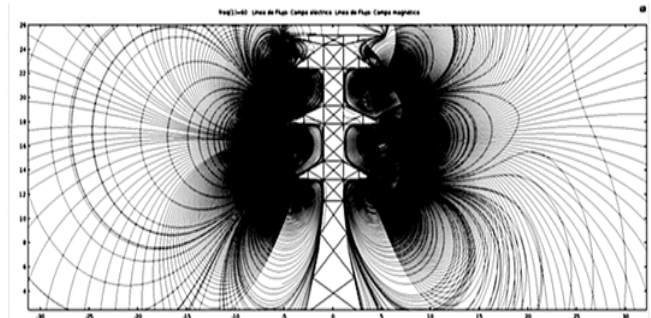


Figura 7. Líneas de intensidad de campo eléctrico y flujo magnético. Fuente: elaboración propia

Estas figuras demuestran las curvas de nivel correspondientes al efecto de potencial eléctrico presentado en la línea de distribución usando los parámetros reales y su estado de operación para tener un valor más cercano, [13].

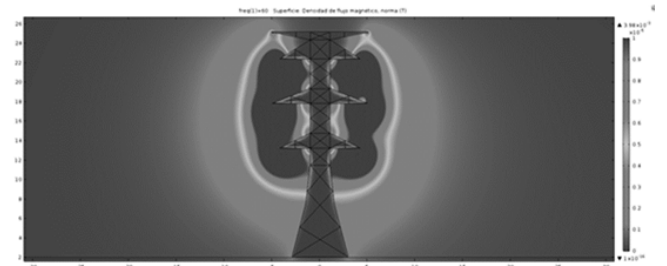


Figura 8. Densidad de flujo magnético. Fuente: elaboración propia.

En tanto, las curvas de nivel de potencial eléctrico (V) son líneas de vectores como representación de campo eléctrico.

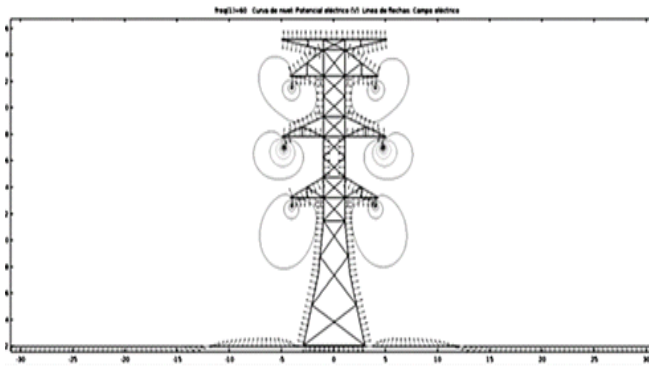


Figura 9. Incidencia de intensidad de campo eléctrico sobre la estructura. Fuente: elaboración propia

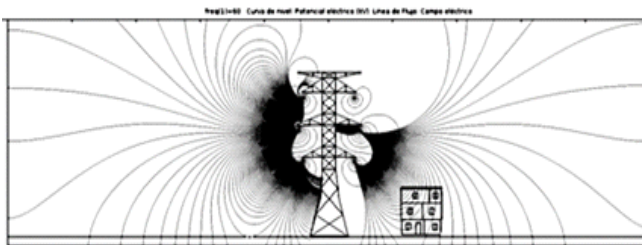


Figura 10. Representación del potencial eléctrico influenciando una vivienda. Fuente: elaboración propia

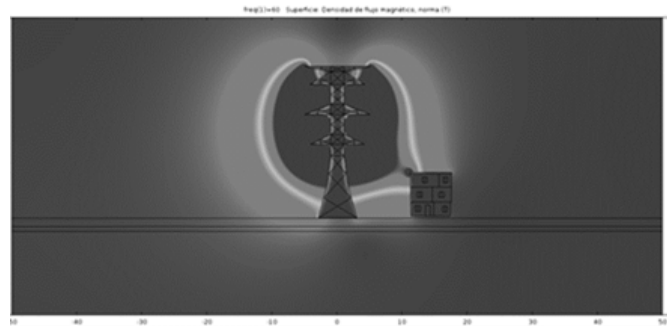


Figura 11. Representación Densidad de Flujo Magnético y su interacción con una vivienda. Fuente: elaboración propia

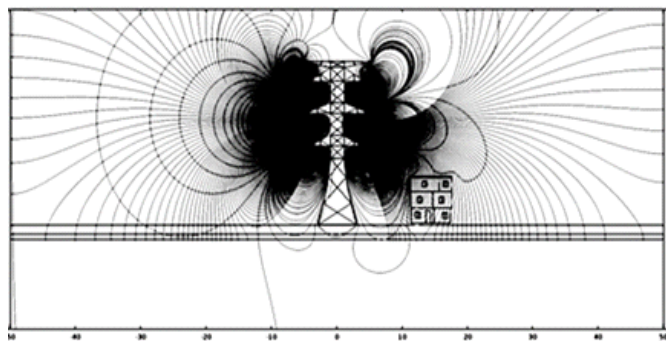


Figura 12. Completa interacción de campo eléctrico y campo magnético con la vivienda. Fuente: elaboración propia

4. Conclusiones

En la determinación del factor de compensación para estimar valores de campo eléctrico y magnético en la línea de distribución, caso 115kV, lo relacionado a la norma que aplica a las instalaciones y redes eléctricas en el país (RETIE, 2013), establece los valores de máxima intensidad y flujo para campo electromagnético, y para frecuencia industrial (60 Hz), en inmediaciones de zonas o lugares con influencia respecto al tiempo de exposición a radiación no ionizantes según la “International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection” (ICNIRP), visualizados en la tabla 2.

Existe una ventaja en cuanto a los campos artificiales generados por las líneas de transmisión, ya que estos están en el rango de 0 a 300Hz, los cuales se califican de baja frecuencia; esto permite calcular o medir de manera individual, como la aplicación de una superposición para determinar su valor total, (ICNIRP, 2010).

Tensión [Kv]	Máximo Intensidad de campo [Kv/m]	Campo Eléctrico Límites ICNIRP	Máximo Intensidad de flujo [T]	Campo Magnético Límites ICNIRP
10	0.15	3.6%	6.41	7.7%
33	0.80	19.2%	1.62	1.9%
60	3.57	85.6%	5.14	6.2%
115*	0.67*	16.08%*	1.72*	2.083%*
138	0.80	19.2%	2.06	2.5%
220	13.42	322.6%	8.81	10.6%

Tabla 5. Características materiales relacionadas en zona de estudio. Fuente: elaboración propia

En el caso de cálculos de constantes para las variables, correspondientes a la tabla 5; se obtuvieron los valores para el nivel de tensión gracias al operador de la constante para tener un valor aproximado en el nivel de tensión de 115kV.

De otro lado, con respecto al contraste entre el Campo Eléctrico Matlab. (1,1 kV/m) con el valor nominal dado por la Norma técnica Colombiana (NTC): el campo eléctrico calculado con el programa corresponde a un 25% referido a la exposición del público permitido y al 13,3%, respectivamente, de lo permitido para el ocupacional.

Para los valores de máxima intensidad de campo eléctrico para la norma internacional no contemplan el ajuste para el nivel de tensión para las líneas de distribución en 115kV. Por lo cual se realiza un ajuste del 1.66 para cada casilla dándonos el calor para el 115 kV respecto del 138kV.

De otra parte, para la determinación de la equivalencia proporcional para la máxima intensidad de campo eléctrico usando el factor de compensación de 1,66 en el caso de 115kV se determina que para ese nivel de tensión el campo es de 0,67 y la relación con el campo calculado con MatLab® puede llegarse a caracterizar que hay un aumento de 61% según ICNIRP.

En relación con el campo eléctrico(), se pudo determinar que con Matlab se llega a un 26,4 % tomando el valor del 1,1 kV/m y referenciando a la tabla de ICNIRP.

En tanto, en COMSOL fueron considerados los mismos parámetros que en MatLab® logrando determinar que para el cálculo del campo eléctrico COMSOL arroja un valor de 0,2 kV/m. Pero al hacer un paralelo entre herramientas de software se pudo observar que existe una discordancia entre los valores obtenidos. Esto se debe a que en COMSOL se logró incluir como objeto propio de estudio dentro de la geometría general: a la torre eléctrica; y el campo se comporta de manera diferente pues en otros casos donde solo es tenida en cuenta las líneas de distribución en medio flotante este factor se pudo asociar a un 18,2% con relación al 1,1

kV/m de MatLab®.

Según los datos obtenidos, gracias al diseño propuesto en Comsol donde se tuvo en cuenta la torre eléctrica, se determinan los siguientes valores para el nivel ocupacional del 2,5% y del público 4,8% de campo eléctrico.

Con respecto a la norma ICNIRP, se especifica que el nivel de campo eléctrico relacionado con esta es de 29,8%. Según lo estipulado como máxima intensidad de campo y el campo eléctrico por ICNIRP, está en el orden de 4,8% obtenido usando MatLab®.

Con respecto al Campo Magnético, comparativamente el modelo en MatLab® arroja resultados de 3,17

Esto por las condiciones ya mencionados del modelamiento con la torre. Es decir, La discordancia obedece al fenómeno ya mencionado y está de orden de los 53.62% en relación del campo máximo en COMSOL.

En relación con los niveles de exposición general público en la NTC para 8 horas continuas, relacionadas por MatLab y COMSOL son: 1,6% y 0,85%, respectivamente.

En la norma ICNIRP, contemplando la máxima intensidad de flujo en el caso estudio de nivel de tensión de 115kV, se obtiene que MatLab arroja un valor del 1,45% -cercano en lo que respecta al caso- y en COMSOL se relaciona un valor muy cercano a lo esperado: del 98,83%.

Según lo establecido para el campo magnético en la ICNIRP, se determina que para MatLab arroja el valor del 3,83% y COMSOL a su vez 2,0587%; esto determina un mayor valor para MatLab pues se modela de manera general, en tanto que COMSOL abarca más cantidad de variables que hace dispendioso el resultado.

De manera general, el análisis nos indica que a nivel nacional se cumple de manera básica con algunas condiciones establecidas con las normas aplicadas, pero al remitirse a las normas internacionales, las cuales tienen patrones y mayor grado de exactitud, se observa que no se cumpliría con los requerimientos mínimos sobre distancias de seguridad y zonas de servidumbre.

5. Reconocimientos

Al grupo de investigación adscrito al centro de investigaciones y desarrollo científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (CIDC).

Referencias

- [1] UPME, “Unidad de planeación minero energética”, 2016. [En línea]. Disponible en: www.upme.gov.co.
- [2] H. R. Jiménez Bejarano, J. J. Pinzón Casallas y Y. A. Franco Flórez, “Criterio de diseño y construcción de líneas de transmisión subterráneas 115 y 230 KV.”, tesis, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2006.
- [3] Habitat Bogotá, “Principios éticos y jurídicos del urbanismo”, 2012. [En línea]. Disponible en : www.habitatbogota.gov.co/index.php/revitalizacion/1188-principios-eticos-y-juridicos-del-urbanismo.
- [4] R. D. Begamudre, “Extra high voltage AC transmission engineering”, India: New Age International (P) Ltd., Publishers, 1986.
- [5] M. N. Sadiku, “Elementos de Electromagnetismo”, EEUU: Oxford University press, 2003.
- [6] ICNIRP, “ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time varying electric and magnetic fields (1 hz – 100 khz), published in: health physics”, ICNIRP, 2010, pp. 818-836.
- [7] NTC 2050, “NTC - NORMA TÉCNICA COLOMBIANA”, Bogotá: ICONTEC, 1997.
- [8] V. Henao Céspedes, “Propuesta metodológica para medición de la contaminación electromagnética y su aplicación en la elaboración de un mapa de riesgo de la ciudad de Manizales”, tesis M.Sc., Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2012.
- [9] RETIE, “Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)”, Bogotá, 2013.
- [10] W. S. Achury y C. E. Benavides, “Cambio De Cable Conductor Y Corrección De Punto Caliente En Subestación El Salitre 115 kV”, Interconexión Eléctrica S.A. ISA, Medellín, 2016.
- [11] PROCABLES, “Aleaciones PROCABLES”, 2017. [En línea]. Disponible en: www.procables.com.co/downloads/aleaciones/1350-ACSR.pdf.
- [12] S. Tupsie, “Análisis de los efectos de campo electromagnético usando transposición en líneas de transmisión”, Tailandia, 2009.
- [13] K. Hameyer, “Métodos numéricos para evaluar el campo electromagnético sobre líneas de transmisión”, Bélgica.