



**EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN
ESP**

Unidad Centro de Excelencia Técnica Normalización
y Laboratorios

GM-07

Guía Metodológica: Cálculo de campos electromagnéticos en redes de distribución

EPM-UCET-NYL-GM-07

Agosto 2019

Elaboración, Revisión y Aprobación

Actividad	Tema	Nombre
Elaboró	Guía Metodológica: Cálculo de campos electromagnéticos en redes de distribución	Consultoría Colombiana S.A
Revisó		José Daniel Acosta Moreno
Aprobó		Mónica Rueda Aguilar

Requeridores

Destinatario	Cargo	No. de Copias
Johan Sebastián Higuera Higuera	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería	1
Gabriel Jaime Romero Choperena	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería	1

Revisiones

Revisión	Fecha dd/mm/aaaa	Descripción de la revisión
01	29/08/2019	Versión inicial

© Copyright: Empresas Públicas de Medellín ESP. No está permitida su reproducción por ningún medio impreso, fotostático, electrónico o similar, sin la previa autorización escrita del titular de los derechos reservados.

CONTENIDO

1	OBJETO	6
2	ALCANCE.....	7
3	DOCUMENTOS DE REFERENCIA	8
4	DEFINICIONES	9
5	CONSIDERACIONES GENERALES	10
6	CALCULO DE CAMPOS ELECTROMAGNETICOS PARA REDES DE DISTRIBUCION.....	11
6.1	CALCULO DE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELECTRICO PARA REDES DE DISTRIBUCION DESNUDAS.....	11
6.1.1	Cumplimiento de valor de campo eléctrico conforme a lo establecido por RETIE 15	
6.2	CALCULO DE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELECTRICO PARA REDES DE DISTRIBUCION AISLADAS Y SEMIAISLADAS	15
6.2.1	Campos eléctricos en redes aisladas con pantalla electrostática.....	15
6.3	CALCULO DE LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNETICO PARA REDES DE DISTRIBUCION.	18
6.3.1	Conductores desnudos	18
6.3.1	Densidad de flujo magnético conforme a lo establecido en el RETIE	21
7	CALCULO DE CAMPOS ELECTROMAGNETICOS MEDIANTE SOFTWARE.....	23
8	EJEMPLOS DE APLICACIÓN	24
8.1	EJEMPLO DE EVALUACION DE CAMPO ELECTRICO	24
8.1.1	Campo eléctrico en el punto P.....	26
8.1.2	Campo eléctrico en el punto M	28
8.2	EJEMPLO DE EVALUACION DE CAMPO MAGNETICO	29
8.2.1	Campo magnético en el punto P.....	31
8.2.2	Campo magnético en el punto M	35
	ANEXO A CARACTERÍSTICAS DE LOS CONDUCTORES ELÉCTRICOS EN UNA RED ELÉCTRICA DE DISTRIBUCIÓN	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos	15
Tabla 2 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos	21
Tabla 3 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos	28
Tabla 4 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos	29
Tabla 5 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos.	37
Tabla 6 Características de conductores ACSR de la red de distribución.....	39
Tabla 7 Características de conductores AAAC de la red de distribución	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Imágenes de los conductores	12
Figura 2 Evaluación del campo eléctrico en un punto M por el método de las imágenes .	12
Figura 3 Campo eléctrico en cilindros coaxiales	16
Figura 4 Campo eléctrico entre dos dieléctricos en paralelo	17
Figura 5 Evaluación del campo magnético en un punto M por el método de las imágenes	18
Figura 6 Evaluación del campo magnético en un punto M	20
Figura 7 Evaluación de campo eléctrico de red doble circuito 13,2 y 44 kV	25
Figura 8 Evaluación de campo magnético de red eléctrica de doble circuito 13,2 y 44 kV	30
Figura 9 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos	35

1 OBJETO

Definir el procedimiento para el cálculo de campos electromagnéticos en redes de distribución de energía y en sus proximidades, incluyendo instalaciones internas, redes de baja y media tensión y subestaciones de energía cuyo nivel de tensión sea menor o igual a 57,5 kV.

2 ALCANCE

Este documento está enfocado en definir el procedimiento para el cálculo de campos electromagnéticos en sistemas de distribución y edificaciones cercanas a estos, basado en normas nacionales e internacionales y alineada con los requerimientos descritos en el numeral 10.1 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) [1].

3 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

- [1] Ministerio de Minas y Energía, Resolución No 9 0708, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), Bogotá Colombia, 30 de agosto de 2013. Pag. 210.
- [2] EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition. Electric Power Research Institute.
- [3] Teoría de disrupción en gases. Dieléctricos combinados y Factor de utilización. Apuntes de la asignatura tópicos avanzados de aislamiento. H. Torres. Universidad Nacional de Colombia.

4 DEFINICIONES

Apoyo o estructura: nombre genérico dado al dispositivo de soporte de conductores y aisladores de las líneas o redes aéreas. Pueden ser postes, torres u otro tipo de elemento de soporte [1].

Campo eléctrico: es una alteración del espacio, que hace que las partículas cargadas, experimenten una fuerza debido a su carga, es decir, si en una región determinada una carga eléctrica experimenta una fuerza, entonces en dicha región hay un campo eléctrico. A este campo también se le conoce como campo electrostático debido a que su intensidad en un punto no depende del tiempo. La intensidad del campo eléctrico en un punto depende del nivel de tensión de la instalación y de la distancia a ésta, así: a mayor tensión mayor intensidad de campo eléctrico, y a mayor distancia menor intensidad de campo eléctrico. La intensidad del campo eléctrico se mide en (V/m) o (kV/m). Esta medida representa el efecto eléctrico sobre una carga presente en algún punto del espacio [1].

Campo magnético: es una alteración del espacio que hace que en las cargas eléctricas en movimiento (corrientes) se genere una fuerza proporcional a su velocidad y a su carga. También se le conoce como magnetostático debido a que su intensidad en un punto no depende del tiempo. En teoría, se debería hablar siempre de intensidad de campo magnético, pero en la práctica se toma la densidad de flujo magnético, que se representa con la letra B y se mide en teslas (el gauss ya no se toma como unidad oficial), la cual tiene la siguiente equivalencia: 1 tesla = 1 N/(A.m) = 1 V.s/m² = 1 Wb/m² = 10 000 gauss [1].

Corriente eléctrica: es el movimiento de cargas eléctricas entre dos puntos que no se hallan al mismo potencial, por tener uno de ellos un exceso de electrones respecto al otro [1].

Edificio o edificación: estructura fija, hecha con materiales resistentes para vivienda humana o para otros usos [1].

Fase: designación de un conductor, un grupo de conductores, un terminal, un devanado o cualquier otro elemento de un sistema polifásico que va a estar energizado durante el servicio normal [1].

Puesta a tierra efectiva: Grupo de elementos conductores equipotenciales, en contacto eléctrico con el suelo o una masa metálica de referencia común, que distribuye las corrientes eléctricas de falla en el suelo o en la masa. Comprende electrodos, conexiones y cables enterrados [1].

Tensión nominal: valor convencional de la tensión con el cual se designa un sistema, instalación o equipo y para el que ha sido previsto su funcionamiento y aislamiento. Para el caso de sistemas trifásicos, se considera como tal la tensión entre fases [1].

5 CONSIDERACIONES GENERALES

El campo electromagnético (CEM) es una combinación de ondas eléctricas y magnéticas que se desplazan simultáneamente. El campo electromagnético ocurre debido a la existencia de diferencias de tensiones y a las corrientes eléctricas en un conductor.

La importancia de determinar su magnitud se debe a los posibles efectos nocivos que puede ocasionar en los seres humanos y animales, dependiendo del grado de exposición.

Por esta razón, se debe medir y calcular el campo electromagnético en las redes eléctricas de distribución y de uso final para un punto determinado, donde exista permanencia y circulación de personas y vigilar que el resultado obtenido no supere los valores máximos de exposición establecidos por el RETIE [1].

De esta manera se garantiza el cumplimiento de la normatividad vigente y la seguridad de las personas y animales que se encuentren en cercanía a las redes eléctricas.

La presente guía aborda el análisis de los campos electromagnéticos, mediante la elaboración de procedimientos para el cálculo, de la siguiente forma:

- Cálculo del campo eléctrico: para lo cual se evaluará la variable de intensidad de campo eléctrico.
- Cálculo del campo magnético: para lo cual se evaluará la variable de densidad de flujo magnético.

6 CALCULO DE CAMPOS ELECTROMAGNETICOS PARA REDES DE DISTRIBUCION.

Para el cálculo de campos electromagnéticos en las redes de distribución, se debe determinar por separado la intensidad del campo eléctrico y la densidad de flujo magnético. A continuación, se describe el cálculo de cada una de estas variables.

Se debe tener presente que los procedimientos para determinar la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos aplican para cuando se tiene un solo circuito en las proximidades del punto donde se quiere conocer la magnitud de los campos. En caso de que se tenga más de un circuito (soportados o no en las mismas estructuras), se debe aplicar el mismo procedimiento por separado para cada circuito y sumar las componentes de los campos en cada una de las dimensiones (X, Y y Z), de acuerdo con el principio de superposición.

6.1 CALCULO DE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELECTRICO PARA REDES DE DISTRIBUCION DESNUDAS

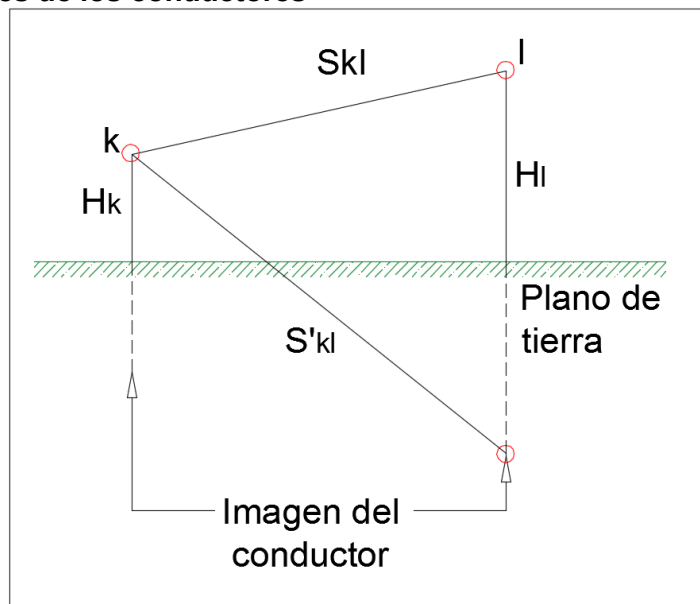
A continuación, se presenta el método para el cálculo del campo eléctrico en las proximidades de las redes de distribución de energía.

El cálculo mencionado tiene como referencia el procedimiento presentado en EPRI AC Transmisión Line Reference Book – 200 kV and above [2].

Dado que el modelo EPRI se desarrolló para la estimación de campo eléctrico en líneas de transmisión, el mismo se adapta para su aplicación en redes de distribución, eliminando el análisis para arreglos en haz de conductores, el cual no aplica. Dicho método se denomina el método de las imágenes. Ver Figura 1.

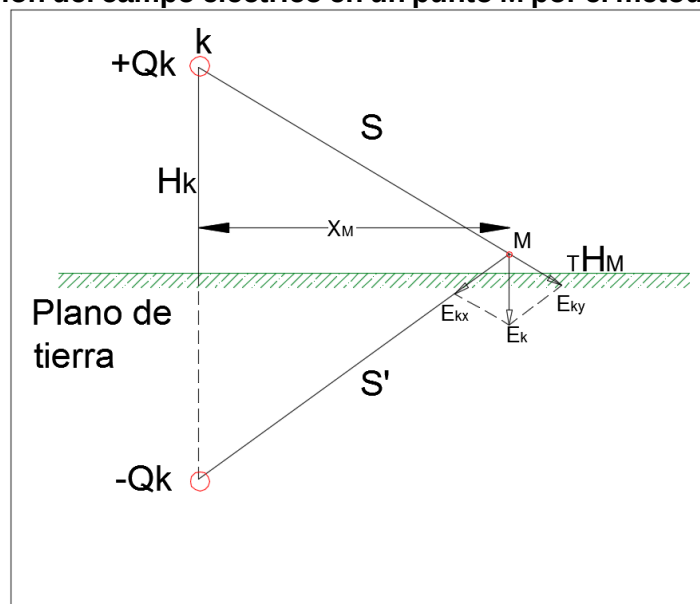
El cálculo de campo eléctrico se hace en dos dimensiones (X,Y) por medio del método de las imágenes. En la Figura 2 se muestra la representación gráfica del método para la evaluación del campo eléctrico en un punto M.

Figura 1 Imágenes de los conductores



Fuente: EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition. Figura 7.3-2. [2]

Figura 2 Evaluación del campo eléctrico en un punto M por el método de las imágenes



Fuente: EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition. Figura 7.3-2. [2]

En el desarrollo del método de las imágenes, la carga de cada uno de los conductores sobre la superficie de la tierra se representa con imágenes de éstas, iguales en magnitud, pero opuestas en polaridad.

Las cargas imagen se ubican debajo de los conductores del sistema, reflejándolos como en un espejo con respecto al plano de tierra. Este arreglo de cargas crea campos eléctricos entre los conductores y la tierra, iguales a lo que se generan por las cargas distribuidas en la superficie de los conductores y la tierra. El campo eléctrico en un punto “M” del espacio se puede calcular a partir de dichas cargas.

El valor de las cargas se calcula con las tensiones de fase de la red de distribución (ver Ecuación 1). En la Ecuación 2 se muestra la expresión para el cálculo del componente real de la carga y en la Ecuación 3 su equivalente imaginario.

$$[Q] = [P]^{-1}[V] \quad \text{Ecuación 1}$$

$$[Q_r] = [P]^{-1}[V_r] \quad \text{Ecuación 2}$$

$$[Q_i] = [P]^{-1}[V_i] \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- [Q] : matriz de carga de las fases (Culombio/metro)
- [Q_r] : componente real de la matriz de carga de las fases.
- [Q_i] : componente imaginaria de la matriz de carga de las fases.
- [V] : matriz de tensiones fase tierra (Voltios)
- [V_r] : componente real de la matriz de tensiones fase tierra (Voltios)
- [V_i] : componente imaginaria de la matriz de tensiones fase tierra (Voltios)
- [P] : matriz de coeficientes de potencial de Maxwell (metros/Faradios)

Los coeficientes de potencial para un sistema de conductores paralelos se determinan por las siguientes expresiones:

$$P_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left(\frac{4H_k}{d_k} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$P_{kl} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left(\frac{S'_{kl}}{S_{kl}} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- P_{kk} : es el coeficiente de potencial propio del conductor k
- P_{kl} : es el coeficiente de potencial mutuo entre los conductores k y l
- d_k : es el diámetro del conductor k
- H_k : es la altura sobre el suelo del conductor k
- S_{kl} : es la distancia entre los conductores k y l
- S'_{kl} : es la distancia entre el conductor k y la imagen del conductor l
- ε : 8,854 X 10⁻¹² F/m

La matriz de coeficientes de potencial es simétrica por lo tanto $P_{ki}=P_{ik}$.

La carga de cada uno de los conductores del sistema de distribución contribuye a la magnitud del campo eléctrico en el punto M, por lo que el campo eléctrico se determina sumando todas las contribuciones de las cargas en ese punto.

En la Figura 2, la distancia horizontal y la altura del conductor k con respecto al punto donde se evaluará el campo (M), se indican como X_M y H_M respectivamente, mientras la altura del conductor con respecto al suelo se denota como H_k .

Las componentes horizontales y verticales del campo eléctrico en el punto M generado por la carga del conductor k se dan en la Ecuación 6 y Ecuación 7 respectivamente.

$$\tilde{E}_{kx} = \frac{(\tilde{Q}_{rk} + j\tilde{Q}_{ik})}{2\pi\epsilon} \left[\frac{X_M}{X_M^2 + (H_k - H_M)^2} - \frac{X_M}{X_M^2 + (H_k + H_M)^2} \right] \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\tilde{E}_{ky} = \frac{(\tilde{Q}_{rk} + j\tilde{Q}_{ik})}{2\pi\epsilon} \left[\frac{H_M - H_k}{X_M^2 + (H_k - H_M)^2} - \frac{H_M + H_k}{X_M^2 + (H_k + H_M)^2} \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

Siendo:

E_{kx} : componente horizontal del campo eléctrico.

E_{ky} : componente vertical del campo eléctrico.

Q_{rk} : componente real de la carga del conductor k.

Q_{ik} : componente imaginario de la carga del conductor k.

H_m : altura del punto M con respecto al suelo.

H_k : altura del conductor k con respecto al suelo.

X_m : distancia horizontal del punto M con respecto al eje de referencia.

Las componentes horizontales y verticales del vector de campo eléctrico se obtienen sumando la contribución de todos los conductores, como muestran las siguientes ecuaciones.

$$\tilde{E}_x = \sum_k \tilde{E}_{kx} = E_{rx} + jE_{ix} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\tilde{E}_y = \sum_k \tilde{E}_{ky} = E_{ry} + jE_{iy} \quad \text{Ecuación 9}$$

El valor rms del campo eléctrico se obtiene por medio de la Ecuación 10:

$$E_{rms} = \sqrt{E_{rx}^2 + E_{ix}^2 + E_{ry}^2 + E_{iy}^2} \quad \text{Ecuación 10}$$

Siendo:

E_{rms} : la magnitud del campo eléctrico (V/m)

6.1.1 Cumplimiento de valor de campo eléctrico conforme a lo establecido por RETIE

Una vez obtenido el valor de la intensidad del campo eléctrico de la Ecuación 10, se compara con los valores máximos exigidos por el RETIE.

En caso de que el valor calculado sea menor o igual al establecido en el RETIE, se considera que se estará cumpliendo con este requerimiento.

En caso de incumplimiento de los valores exigidos en el RETIE, el diseñador deberá realizar los cambios necesarios en las variables involucradas en la red eléctrica hasta cumplir con el requerimiento de valores máximos de campos eléctricos establecidos por el RETIE. Tales modificaciones se pueden realizar en la geometría, el tipo de conductor o la tensión de operación.

En la Tabla 1 se muestran los valores definidos por el RETIE para el cumplimiento de los niveles de campo eléctrico.

Tabla 1 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos

TIPO DE EXPOSICION	INTENSIDAD DE CAMPO ELECTRICO (KV/m)	DENSIDAD DE FLUJO MAGNETICO (μT)
Exposición ocupacional en un día de trabajo de ocho horas	8,3	1000
Exposición del público en general hasta ocho horas continuas	4,16	200

Fuente: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), 30 de agosto de 2013 [1]

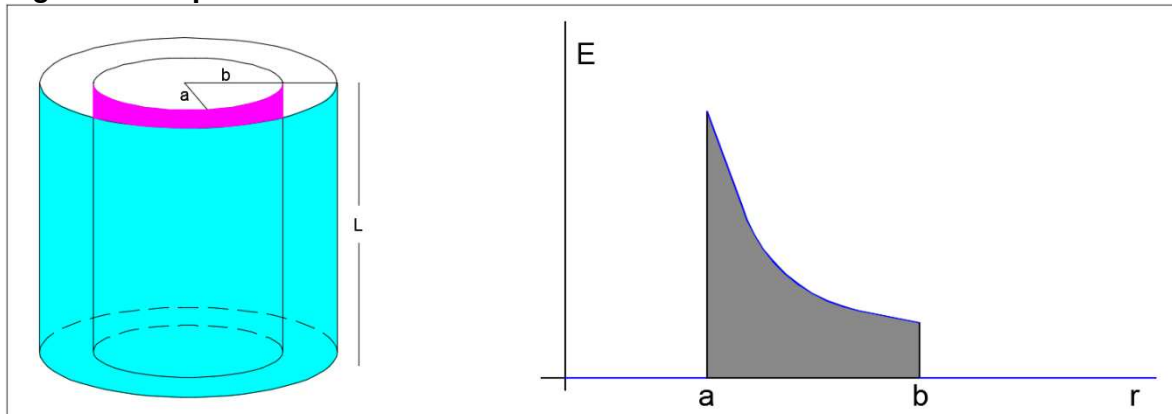
6.2 CALCULO DE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELECTRICO PARA REDES DE DISTRIBUCION AISLADAS Y SEMIAISLADAS

6.2.1 Campos eléctricos en redes aisladas con pantalla electrostática

La intensidad del campo eléctrico se ve afectada por el medio en el que este se propaga, por lo que, para obtener un resultado preciso, durante el cálculo matemático se deben contemplar los efectos del aislamiento y apantallamientos de algunos conductores.

En la Figura 3 se muestra la distribución del campo eléctrico para un arreglo de cilindros coaxiales, como el que se tiene en un cable aislado XLPE con pantalla electrostática. Se puede observar que el campo eléctrico se confina a la región $a < r < b$. En otras palabras, el apantallamiento aísla por completo el campo eléctrico en el interior del conductor, por lo tanto, cuando se emplean conductores aislados XLPE con pantalla electrostática no se requiere calcular el campo eléctrico en las proximidades de dicha red.

Figura 3 Campo eléctrico en cilindros coaxiales



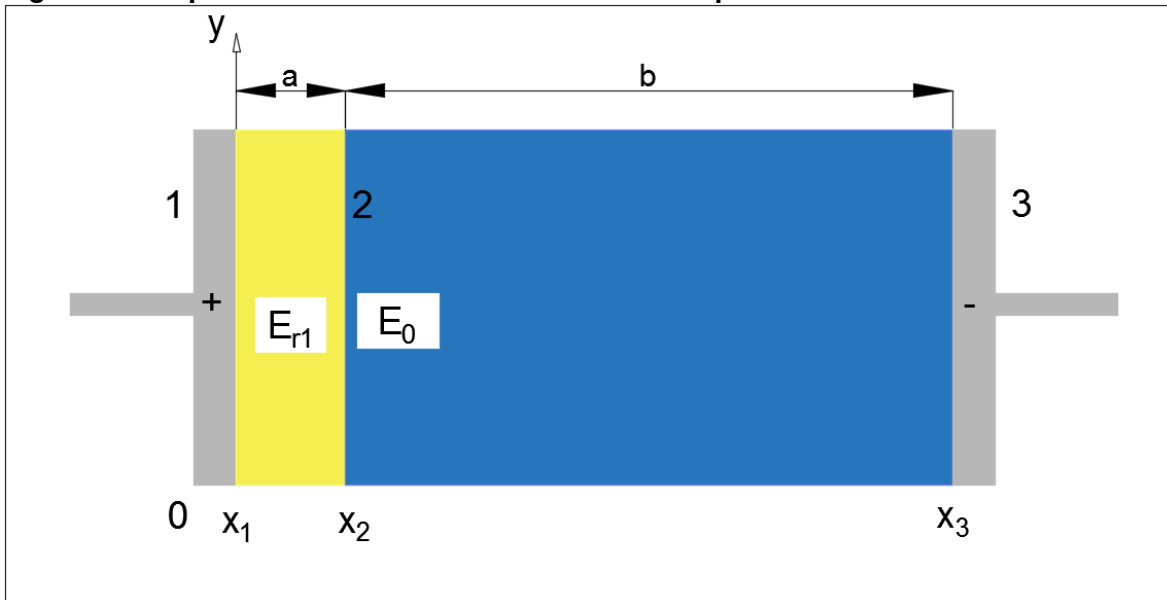
Fuente: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_electrico/cilindro/cilindro.htm

6.2.2 Campos eléctricos en redes semiaisladas

El cálculo del campo eléctrico generado por redes semiaisladas (sin pantalla electrostática) se debe hacer siguiendo el procedimiento presentado en el numeral 6.1. Como se mostrará a continuación para el propósito de esta guía se puede despreciar el efecto del aislante.

En la Figura 4 se presenta un esquema para ilustrar la forma en que se propaga el campo eléctrico a través de dieléctricos en paralelo, donde el valor a representa el grosor del aislamiento del conductor con una permitividad E_{r1} y el valor b es la distancia entre el conductor y el punto donde se evalúa el campo eléctrico, con una permitividad cercana a la del vacío E_0 . Se debe tener en cuenta que en redes de distribución de energía es importante conocer la magnitud del campo eléctrico a una distancia considerable del conductor, en este caso el valor a es del orden de milímetros y el valor b está en el rango de los metros.

Figura 4 Campo eléctrico entre dos dieléctricos en paralelo



Fuente: H. Torres. Teoría de disrupción en gases. Dieléctricos combinados y factor de utilización. Apuntes de la asignatura tópicos avanzados de aislamiento. Universidad Nacional de Colombia [3]

Las siguientes ecuaciones describen el comportamiento del campo en el arreglo descrito anteriormente, como se puede observar en la Ecuación 13 el campo eléctrico es inversamente proporcional al grosor del medio en que se propaga, en este caso el valor a es mucho menor que el valor b , por lo que su efecto se desprecia sin modificar significativamente el resultado. De esta forma, la magnitud del campo eléctrico generado por conductores semiaislados se puede estimar con la Ecuación 15.

$$V_{13} = (E_1 * a) + (E_0 * b) \quad \text{Ecuación 11}$$

$$V_{13} = \frac{D}{E_0} \left(\frac{a}{E_{r1}} + b \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

$$E = \frac{V_{13}}{E_0 \left(\frac{a}{E_{r1}} + b \right)} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$b \gg a \quad \text{Ecuación 14}$$

$$E = \frac{V_{13}}{E_0(b)} \quad \text{Ecuación 15}$$

6.3 CALCULO DE LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNETICO PARA REDES DE DISTRIBUCION.

6.3.1. Conductores desnudos

La densidad de flujo magnético, identificada con la variable B , se utiliza para determinar el valor del campo magnético.

El cálculo del campo magnético tiene como referencia el procedimiento presentado en EPRI AC Transmisión Line Reference Book – 200 kV and above [2].

Dado que el modelo EPRI se desarrolló para la estimación de campo magnético en líneas de transmisión, el mismo se adapta para su aplicación en redes de distribución, eliminando el análisis para arreglos en haz de conductores, el cual no aplica para este caso.

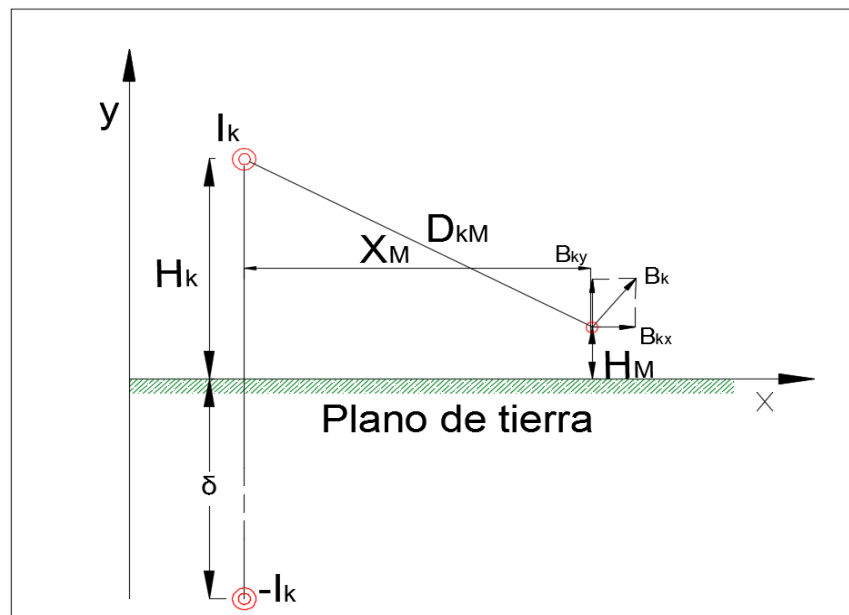
Al igual que en el cálculo del campo eléctrico, el cálculo de campo magnético se puede realizar con suficiente exactitud usando un análisis simplificado en dos dimensiones (X, Y).

En la Figura 5, se muestra la representación gráfica del método de las imágenes para la evaluación del campo magnético en un punto M.

En el desarrollo del cálculo del campo magnético se asume lo siguiente:

- Se considera que los conductores son paralelos entre ellos y su longitud infinita.
- La tierra tiene una baja conducción de campos magnéticos.

Figura 5 Evaluación del campo magnético en un punto M por el método de las imágenes



Fuente: EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition. Figura 7.4-1. [2]

Para representar la existencia de la tierra, se acostumbra, al igual que en el cálculo del campo eléctrico, considerar un conductor colocado a una profundidad δ (Ver Figura 5). Esta profundidad es lo suficientemente grande como para despreciar el efecto de las imágenes, sin pérdida de exactitud en el cálculo.

La profundidad δ se calcula mediante la ecuación 16.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi * f * \mu}} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

δ : profundidad (m)
 f : frecuencia (Hz)
 ρ : resistividad del terreno (Ω -m)
 μ : permeabilidad del terreno (H/m)

La variable μ permeabilidad del terreno es cercana a la del aire ($4\pi * 10^{-7}$ H/m).

Por ejemplo, para una resistividad del terreno de 25 ohm, frecuencia de 60 Hz y permeabilidad $4\pi * 10^{-7}$ H/m. El valor de δ se obtiene de la siguiente forma:

$$\delta = \sqrt{\frac{25}{\pi * 60 * 4 * \pi * 10^{-7}}} \\ \delta = 324 \text{ m}$$

Luego al comparar la distancia δ con la distancia H_k se tiene que $\delta \gg H_k$, lo que hace que el valor del campo magnético evaluado en el punto a una profundidad δ desde el nivel del terreno se desprecie.

Por lo anterior, el análisis del campo magnético en dos dimensiones (X, Y) queda simplificado al que se muestra en la Figura 6, para un punto M.

Así las cosas, el campo magnético en el punto M se calcula con las componentes horizontales y verticales del vector de campo magnético, que resulte de la suma de la contribución de todos los conductores, como muestra en las ecuaciones 12 y 13.

$$\tilde{B}_x = \sum_k \tilde{B}_{kx} = B_{rx} + jB_{ix} \quad \text{Ecuación 17}$$

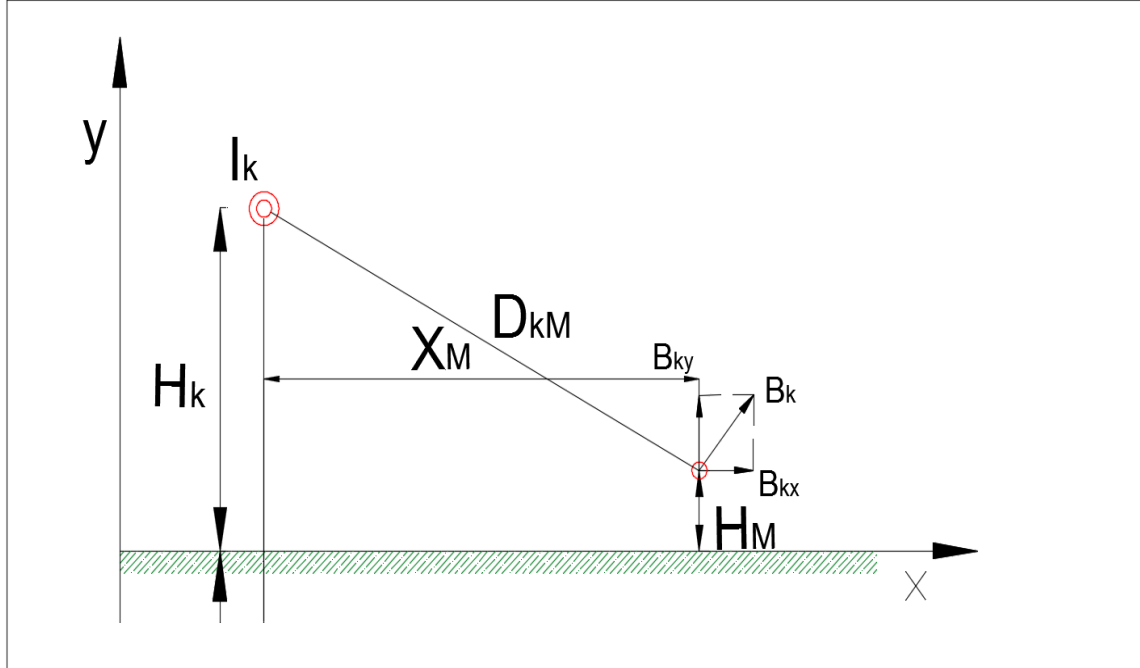
$$\tilde{B}_y = \sum_k \tilde{B}_{ky} = B_{ry} + jB_{iy} \quad \text{Ecuación 18}$$

Siendo:

B_x : componente del campo magnético en el eje x

B_y : componente del campo magnético en el eje y

Figura 6 Evaluación del campo magnético en un punto M



Fuente: EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition. Figura 7.4-1. [2]

La corriente de cada uno de los conductores del sistema de distribución contribuye a la magnitud del campo magnético en el punto M, por lo que el campo magnético se determina sumando todas estas contribuciones.

La distancia horizontal con respecto al punto donde se evaluará el campo (M) se indica como X_M y la altura de este punto respecto al suelo como H_M , mientras la altura del conductor k con respecto al suelo se denota como H_k . Las componentes horizontales y verticales del campo magnético en el punto M generado por la corriente del conductor k se dan en la Ecuación 19 y Ecuación 20 respectivamente.

$$\tilde{B}_{kx} = \frac{2 \cdot (10)^{-7} (\tilde{I}_{rk} + j\tilde{I}_{ik}) \cdot (X_M - X_k)}{(X_M - X_k)^2 + (H_M - H_k)^2} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\tilde{B}_{ky} = \frac{2 \cdot (10)^{-7} (\tilde{I}_{rk} + j\tilde{I}_{ik}) \cdot (H_M - H_k)}{(X_M - X_k)^2 + (H_M - H_k)^2} \quad \text{Ecuación 20}$$

Siendo:

B_{kx} : componente horizontal del campo magnético.

B_{ky} : componente vertical del campo magnético.

I_{rk} : componente real de la corriente del conductor k.

I_{jk} : componente imaginario de la corriente del conductor k.

H_m : altura del punto M con respecto al suelo.

H_k : altura del conductor k con respecto al suelo.

X_m : distancia horizontal del punto M con respecto al eje de referencia.

X_k : distancia horizontal del conductor k con respecto al eje de referencia.

El valor RMS del campo magnético se obtiene por medio de la Ecuación 21:

$$|B|_{rms} = \sqrt{B_{rx}^2 + B_{ix}^2 + B_{ry}^2 + B_{iy}^2} \quad \text{Ecuación 21}$$

Siendo:

B_{rms} : la magnitud del campo magnético (T)

6.3.1 Densidad de flujo magnético conforme a lo establecido en el RETIE

El valor obtenido mediante la Ecuación 21, se compara con el valor máximo exigido por el RETIE. En caso de que el valor calculado sea menor o igual al establecido en el RETIE, se considera que se cumple el requerimiento.

En caso de incumplimiento de los valores exigidos en el RETIE, el diseñador deberá realizar los cambios necesarios en la red eléctrica hasta cumplir con el requerimiento de valores máximos de campos magnéticos establecidos por el RETIE.

De esta forma, en caso de no lograr el valor máximo exigido por el RETIE el diseñador deberá realizar cambios en las variables involucradas en la red eléctrica, tales como la geometría, el tipo de conductor, la potencia transportada o la tensión de operación.

La Tabla 2 establece los valores máximos de densidad de flujo magnético establecidos por el RETIE.

Tabla 2 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos

TIPO DE EXPOSICION	INTENSIDAD DE CAMPO ELECTRICO (KV/m)	DENSIDAD DE FLUJO MAGNETICO (μ T)
Exposición ocupacional en un día de trabajo de ocho horas	8,3	1000
Exposición del público en general hasta ocho horas continuas	4,16	200

Fuente: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), Bogotá Colombia, 30 de agosto de 2013. [1]

6.3.3 Campos magnéticos en redes aisladas y semiaisladas

Para las redes aisladas y semiaisladas, la corriente de fase en el conductor se calcula asumiendo que no existe flujo de corriente en la pantalla del conductor.

Dado que el efecto del campo magnético dependerá de la permeabilidad del medio en el que actúa, en este caso el material aislante del conductor y el aire, el efecto sobre el material aislante es despreciable, de manera similar al campo eléctrico, con lo cual el medio circundante alrededor del conductor es el aire, resultando en un cálculo de campo magnético similar al cálculo para un conductor desnudo.

7 CALCULO DE CAMPOS ELECTROMAGNETICOS MEDIANTE SOFTWARE

Previamente se ha descrito la metodología para el cálculo de campos electromagnéticos en las redes de distribución haciendo uso de las ecuaciones vectoriales para determinar la intensidad del campo eléctrico y la densidad de flujo magnético en redes de distribución de energía. No obstante, existen otras formas de adelantar dichos cálculos haciendo uso de herramientas de software especializado, por ejemplo, el módulo *EMF Calculator* que hace parte del software *PLS-CADD®*, desarrollado por la *POWER LINE SYSTEMS INC* el cual basa sus cálculos en los métodos del EPRI Red Book [2].

Así mismo, dentro de los applets disponibles por parte de EPRI se tienen dos particulares para el cálculo de intensidad del campo eléctrico y la densidad de flujo magnético en conductores que transporten potencia eléctrica:

EMF 2: Electric Field of Transmission Lines

EMF 6: Magnetic Field from Sets of Current Carrying Conductors

De manera similar a lo definido antes para el cálculo manual, con el uso del software se tendrán que calcular los parámetros para las configuraciones de la red eléctrica, medidos en los casos más críticos, es decir los puntos donde se presenten las flechas máximas.

8 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

8.1 EJEMPLO DE EVALUACION DE CAMPO ELECTRICO

A modo de ejemplo se va a evaluar la magnitud del campo eléctrico generado por una red de media tensión doble circuito de 13,2 y 44 kV, con el fin de verificar el cumplimiento de los valores límite exposición establecidos por el RETIE.

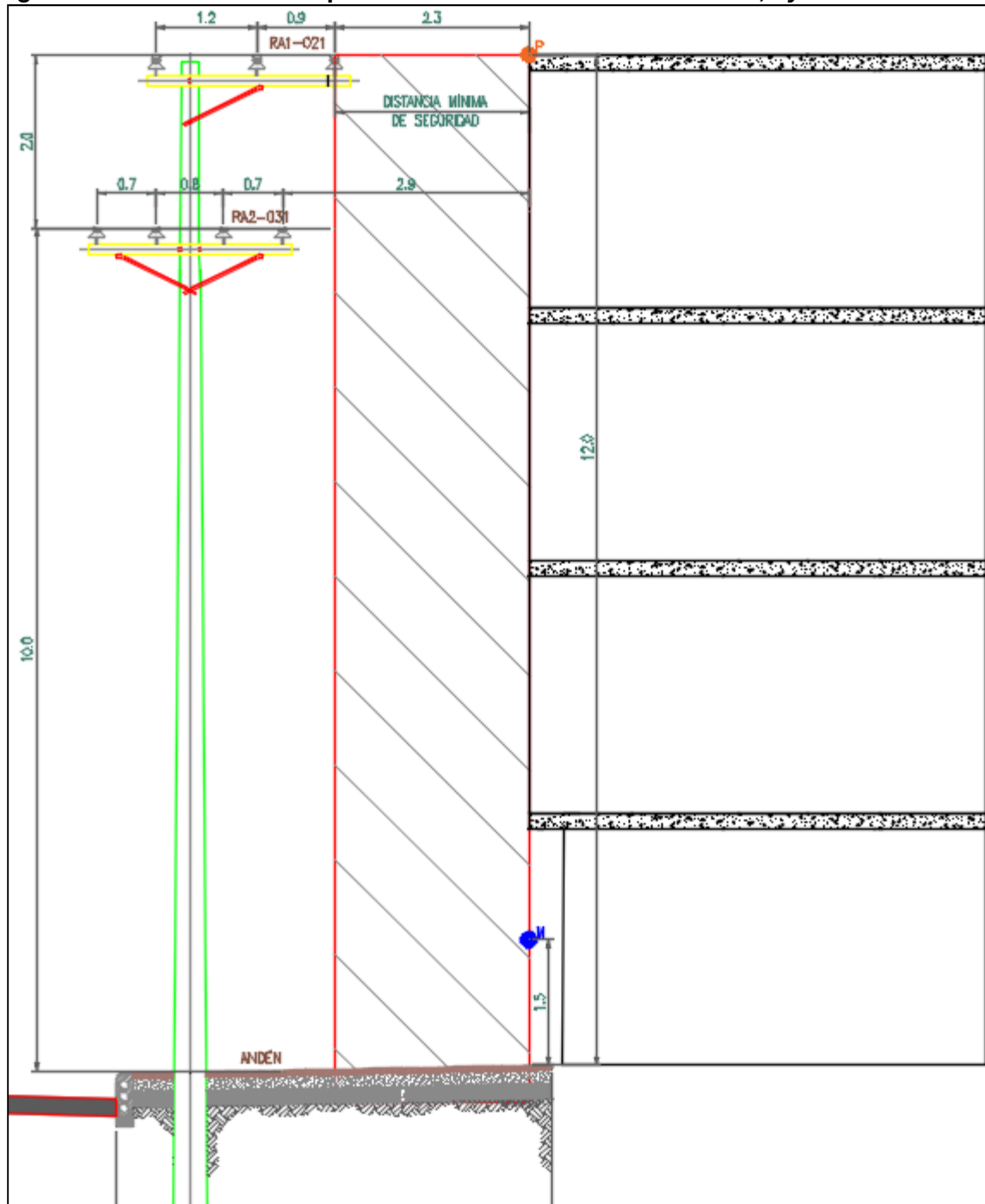
Las normas constructivas de la red son RA1-021 en 44 kV con conductor 266,8 kcmil y RA2-031 en 13,2 kV con conductor 2/0 AWG. Las distancias se muestran en la Figura 7. El campo se evaluará en el punto M que corresponde al espacio público (de tránsito frecuente de personas) y en el punto P (que es el espacio de la edificación más cercano a la estructura). Para el cálculo se asume que el sistema está balanceado.

Del anexo A, se toman los siguientes datos:

- Conductor 266,8 kcmil, diámetro 15,46 mm
- Conductor 2/0 AWG, diámetro 1,35 mm

Debido a que en este caso se tienen dos circuitos que generan campo eléctrico, para conocer su magnitud en un punto dado, se debe aplicar el principio de superposición, evaluando la contribución al campo eléctrico de cada uno de los circuitos por separado y después sumando sus valores para cada eje (X, Y).

Figura 7 Evaluación de campo eléctrico de red doble circuito 13,2 y 44 kV



Fuente: Concol by WSP

8.1.1 Campo eléctrico en el punto P

- Campo eléctrico producido por la red de 44 kV

De acuerdo con la guía metodológica la evaluación de campo eléctrico a partir de la carga que lo genera se realiza por medio de la siguiente expresión (Ecuación 1):

$$[Q] = [P]^{-1}[V]$$

La matriz P se construye a partir de las distancias entre conductores, entre conductores y el suelo y entre conductores y sus imágenes, cuyos valores se muestran a continuación.

Distancia entre los ejes de conductores de las fases 1 y 2	1,2 m
Distancia entre los ejes de conductores de las fases 1 y 3	2,1m
Distancia entre los ejes de conductores de las fases 2 y 3	0,9 m
Distancia entre el eje de la fase1 y la imagen de la fase 2	24,18 m
Distancia entre el eje de la fase 1 y la imagen de la fase 3	24,25 m
Distancia entre el eje de la fase 2 y la imagen de la fase 1	24,18 m
Distancia entre el eje de la fase 2 y la imagen de la fase 3	24,18 m
Distancia entre el eje de la fase 3 y la imagen de la fase 1	24,25 m
Distancia entre el eje de la fase 3 y la imagen de la fase 2	24,15 m

Con esta información se construye la siguiente matriz de coeficientes de potenciales de Maxwell P:

$$P := \begin{pmatrix} \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \left(\frac{4 \cdot h_1}{d_1} \right) & \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \left(\frac{X_{12}}{D_{12}} \right) & \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \left(\frac{X_{13}}{D_{13}} \right) \\ \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \left(\frac{X_{21}}{D_{21}} \right) & \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \left(\frac{4 \cdot h_2}{d_2} \right) & \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \left(\frac{X_{23}}{D_{23}} \right) \\ \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \left(\frac{X_{31}}{D_{31}} \right) & \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \left(\frac{X_{32}}{D_{32}} \right) & \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \left(\frac{4 \cdot h_3}{d_3} \right) \end{pmatrix}$$

$$P = \begin{pmatrix} 1.445 \times 10^{11} & 5.398 \times 10^{10} & 4.398 \times 10^{10} \\ 5.398 \times 10^{10} & 1.445 \times 10^{11} & 5.916 \times 10^{10} \\ 4.398 \times 10^{10} & 5.916 \times 10^{10} & 1.445 \times 10^{11} \end{pmatrix}$$

Posteriormente se obtiene la matriz inversa P^{-1} denotada como C, la matriz de tensiones V y la de carga de los conductores Q.

$$C = \begin{pmatrix} 8.306 \times 10^{-12} & -2.484 \times 10^{-12} & -1.51 \times 10^{-12} \\ -2.484 \times 10^{-12} & 9.054 \times 10^{-12} & -2.95 \times 10^{-12} \\ -1.511 \times 10^{-12} & -2.95 \times 10^{-12} & 8.586 \times 10^{-12} \end{pmatrix}$$

$$V = \begin{pmatrix} -1.27 \times 10^4 + 2.2i \times 10^4 \\ -1.27 \times 10^4 - 2.2i \times 10^4 \\ 2.54 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

$$Q := A \cdot V$$

$$Q = \begin{pmatrix} -1.123 \times 10^{-7} + 2.374i \times 10^{-7} \\ -1.584 \times 10^{-7} - 2.538i \times 10^{-7} \\ 2.748 \times 10^{-7} + 3.167i \times 10^{-8} \end{pmatrix}$$

Finalmente se calculan los valores del campo eléctrico en el punto evaluado, de acuerdo con las ecuaciones 6 y 7:

$$\tilde{E}_{kx} = \frac{(\tilde{Q}_{rk} + j\tilde{Q}_{ik})}{2\pi\epsilon} \left[\frac{X_p}{X_p^2 + (H_k - H_p)^2} - \frac{X_p}{X_p^2 + (H_k + H_p)^2} \right] = 809.716 - 217.476 i \text{ [V/m]}$$

$$\tilde{E}_{ky} = \frac{(\tilde{Q}_{rk} + j\tilde{Q}_{ik})}{2\pi\epsilon} \left[\frac{H_p - H_k}{X_p^2 + (H_k - H_p)^2} - \frac{H_p + H_k}{X_p^2 + (H_k + H_p)^2} \right] = -5.971 - 8.72 i \text{ [V/m]}$$

$$|E| = 0,838 \text{ kV/m}$$

Una vez se obtiene la contribución al campo eléctrico en el punto P de la red de 44 kV, se determina el campo generado por los conductores de 13,2 kV en el mismo punto.

- Campo eléctrico producido por la red de 13,2 kV

Se repite el mismo procedimiento que se realizó en 44 kV (cambiando las distancias y demás datos de entrada requeridos) y se obtienen los siguientes resultados:

$$\tilde{E}_{kx} = 55.147 - 14.501 i \text{ [V/m]}$$

$$\tilde{E}_{ky} = 84.308 - 29.386 i \text{ [V/m]}$$

$$|E| = 0,106 \text{ kV/m}$$

El campo eléctrico total en el punto P se obtiene sumando las componentes en X y en Y de los campos generados por cada línea:

$$\tilde{E}_{Totalx} = (809.716 + 55.147) - (217.476 + 14.501)i = 864.863 - 231.977i [V/m]$$

$$\tilde{E}_{Totaly} = (-5.971 + 84.308) - (8.72 + 29.386)i = 78.337 - 38.106i [V/m]$$

$$|E_{Total P}| = 0,9 \text{ kV/m}$$

El valor tolerable para campos eléctricos de acuerdo con el RETIE es 4,16 kV/m.

Tabla 3 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos

TIPO DE EXPOSICION	INTENSIDAD DE CAMPO ELECTRICICO (KV/m)	DENSIDAD DE FLUJO MAGNETICO (μT)
Exposición ocupacional en un día de trabajo de ocho horas	8,3	1000
Exposición del público en general hasta ocho horas continuas	4,16	200

Fuente: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), 30 de agosto de 2013.

El valor calculado en el punto P es 0,9 kV/m y se encuentra dentro del límite de exposición tolerable.

8.1.2 Campo eléctrico en el punto M

El procedimiento para realizar el cálculo en el punto M es igual al utilizado para el cálculo en el punto P, con el cual se obtienen los siguientes resultados:

- Campo eléctrico producido por la red de 44 kV

$$\tilde{E}_{kx} = -15.015 + 10.756 i [V/m]$$

$$\tilde{E}_{ky} = -57.828 - 6.49 i [V/m]$$

$$|E| = 0,061 \text{ kV/m}$$

- Campo eléctrico producido por la red de 13,2 kV

$$\tilde{E}_{kx} = -3.505 + 2.988 i [V/m]$$

$$\tilde{E}_{ky} = -23.815 - 1.027 i [V/m]$$

$$|E| = 0,024 \text{ kV/m}$$

El campo eléctrico total en el punto M se obtiene sumando las componentes en X y en Y de los campos generados por cada línea:

$$\tilde{E}_{Totalx} = -(15.015 + 3.505) + (10.756 + 2.988) i = -18.52 + 13.744 i [V/m]$$

$$\tilde{E}_{Totaly} = -(57.828 + 23.815) - (6.49 + 1.027) i = -81.643 - 7.517 i [V/m]$$

$$|E_{Total M}| = 0,0852 \text{ kV/m}$$

El valor tolerable para campos eléctricos de acuerdo con el RETIE es 4,16 kV/m.

Tabla 4 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos

TIPO DE EXPOSICION	INTENSIDAD DE CAMPO ELECTRICO (KV/m)	DENSIDAD DE FLUJO MAGNETICO (μT)
Exposición ocupacional en un día de trabajo de ocho horas	8,3	1000
Exposición del público en general hasta ocho horas continuas	4,16	200

Fuente: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), Bogotá Colombia, 30 de agosto de 2013.

El valor calculado en el punto P es 0,0852 kV/m y encuentra dentro del límite de exposición tolerable.

8.2 EJEMPLO DE EVALUACION DE CAMPO MAGNETICO

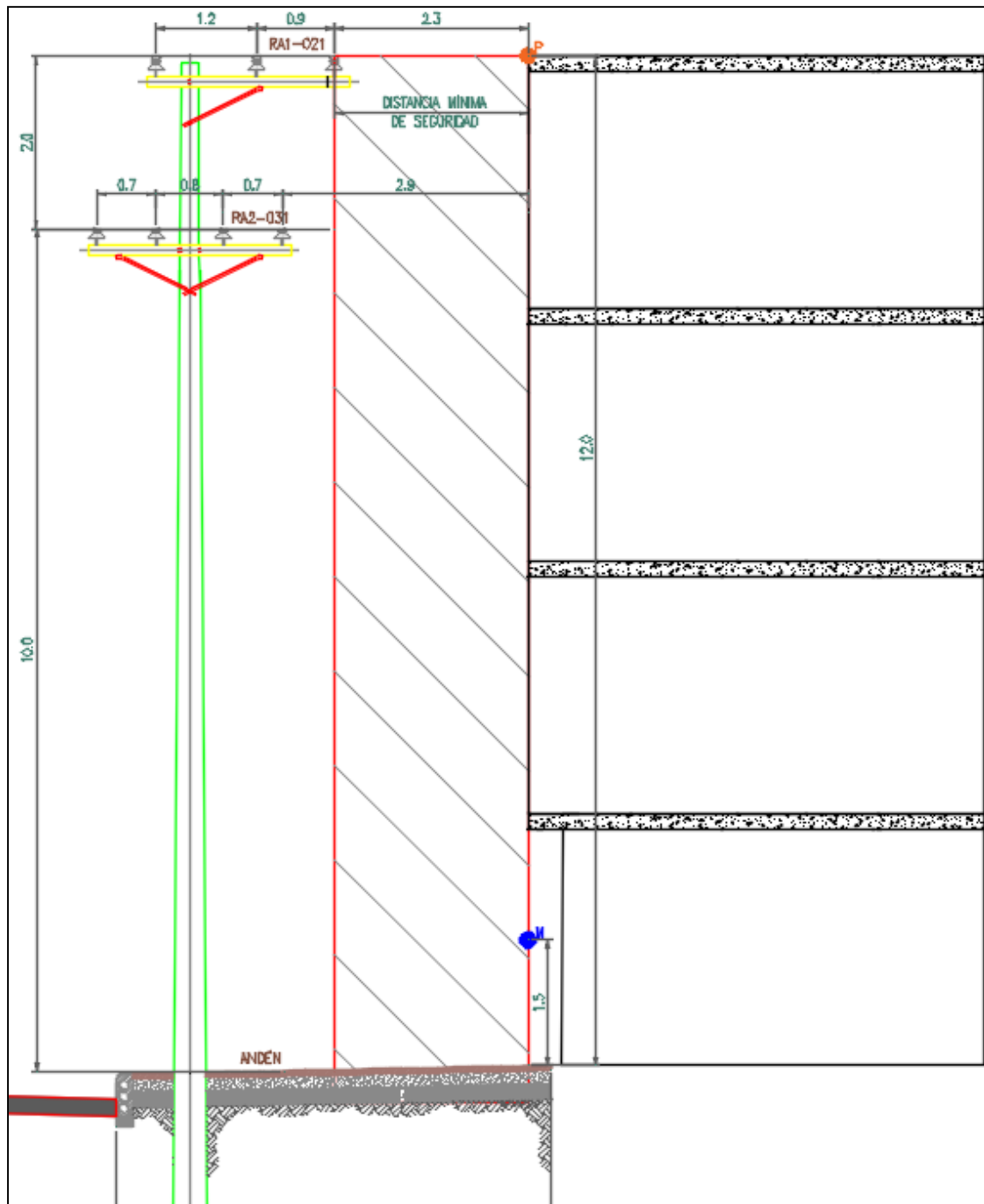
A modo de ejemplo se evaluará la magnitud del campo magnético generado por una red de media tensión doble circuito de 13,2 y 44 kV, con el fin de verificar que cumplan con los valores límite de exposición exigidos por el RETIE.

Las normas constructivas de la red son RA1-021 en 44 kV con conductor 266 kcmil y RA2-031 en 13,2 kV con conductor 2/0 AWG, las distancias se muestran en la Figura 8. El circuito de 44 kV transporta una potencia nominal de 10 MVA, mientras que la potencia nominal del circuito de 13,2 kV es 6 MVA. Para el cálculo se asume que el sistema está balanceado.

El campo se evaluará en el punto M que corresponde al espacio público (de tránsito frecuente de personas) y en el punto P (que es el espacio de la edificación más cercano a la estructura).

Debido a que en este caso se tienen dos circuitos que generan campo magnético, para conocer la magnitud de este en un punto se debe aplicar el principio de superposición, evaluando la contribución al campo de cada uno de los circuitos por separado y después sumando sus valores para cada eje (X, Y).

Figura 8 Evaluación de campo magnético de red eléctrica de doble circuito 13,2 y 44 kV



Fuente: Concol by WSP

8.2.1 Campo magnético en el punto P

- Campo magnético producido por la red con nivel de tensión de 44 kV

De acuerdo con la guía metodológica la evaluación del campo magnético a partir de la corriente eléctrica en conductores está dada por la Ecuación 19 y Ecuación 20, las cuales relacionan las componentes del campo magnético en un plano cartesiano con ejes (X, Y):

$$\tilde{B}_{kx} = \frac{2 \cdot (10)^{-7} (\tilde{I}_{rk} + j\tilde{I}_{ik}) \cdot (X_P - X_K)}{(X_P - X_K)^2 + (H_P - H_K)^2}$$

$$\tilde{B}_{ky} = \frac{2 \cdot (10)^{-7} (\tilde{I}_{rk} + j\tilde{I}_{ik}) \cdot (H_P - H_K)}{(X_P - X_K)^2 + (H_P - H_K)^2}$$

Las ecuaciones anteriores permiten determinar el campo magnético en el eje X y Y generado por un conductor. La red considerada es trifásica por lo que se deben evaluar los campos generados por cada uno de los conductores y sumar sus componentes en cada dimensión. A continuación, se definen las variables de las que dependen las expresiones para el campo magnético.

Para definir las distancias se toman como origen, en la vertical, al eje del conductor 1 y en la horizontal, al suelo.

Distancia horizontal del punto P con respecto a la fase 1	4,4 m
Distancia horizontal del conductor de la fase1 con respecto al eje de referencia en Y	0 m
Distancia vertical del conductor de la fase 1	12 m
Distancia horizontal del punto P con respecto a la fase 2	3,2 m
Distancia horizontal del conductor de la fase 2 con respecto al eje de referencia en Y	1,2 m
Distancia vertical del conductor de la fase 2	12 m
Distancia horizontal del punto P con respecto a la fase 3	2,3 m
Distancia horizontal del conductor de la fase 3 con respecto al eje de referencia en Y	2,1 m
Distancia vertical del conductor de la fase 3	12 m
Distancia vertical del punto P	12 m

Teniendo en cuenta que el sistema es balanceado la corriente se calcula de la siguiente forma:

$$i = \frac{10 \cdot 10^6 [VA]}{\sqrt{3} \cdot 44 \cdot 10^3 [V]} = 131,22 [A]$$

$$i_1 = 131,22 \angle 120^\circ = -65,61 + 113,64 i$$

$$i_2 = 131,22 \angle -120^\circ = -65,61 - 113,64 i$$

$$i_3 = 131,22 \angle 0^\circ = 131,22$$

Con los datos de entrada definidos anteriormente se obtienen los campos magnéticos en el eje X y Y generados por cada uno de los conductores:

Para el eje X, empleando la Ecuación 19, para cada uno de los conductores se obtienen B_1 , B_2 y B_3 que corresponden a los campos magnéticos generados por los conductores 1, 2 y 3 respectivamente.

$$B_1 := \left[\frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_1 \cdot (X_1 - D_1)}{(X_1 - D_1)^2 + (h_4 - h_1)^2} \right] = -2.982 \times 10^{-6} + 5.165i \times 10^{-6}$$

$$B_2 := \left[\frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_2 \cdot (X_2 - D_2)}{(X_2 - D_2)^2 + (h_p - h_2)^2} \right] = -6.561 \times 10^{-6} - 1.136i \times 10^{-5}$$

$$B_3 := \left[\frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_3 \cdot (X_3 - D_3)}{(X_3 - D_3)^2 + (h_p - h_3)^2} \right] = 1.312 \times 10^{-4}$$

El campo magnético total en el eje X es la suma de las contribuciones de todos los conductores.

$$B_4 = B_1 + B_2 + B_3$$

Para el eje Y, empleando la ecuación 20, para cada uno de los conductores se obtienen B_5 , B_6 y B_7 que corresponden a los campos magnéticos generados por los conductores 1, 2 y 3 respectivamente.

$$B_5 := \left[\frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_1 \cdot (h_p - h_1)}{(X_1 - D_1)^2 + (h_p - h_1)^2} \right] = 0$$

$$B_6 := \left[\frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_2 \cdot (h_p - h_2)}{(X_2 - D_2)^2 + (h_p - h_2)^2} \right] = 0$$

$$B_7 := \left[\frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_3 \cdot (h_p - h_3)}{(X_3 - D_3)^2 + (h_p - h_3)^2} \right] = 0$$

El campo magnético total en el eje Y es la suma de las contribuciones de todos los conductores.

$$B_8 = B_5 + B_6 + B_7$$

De esta forma se obtiene el campo debido a los tres conductores de la red de 44 kV en el punto P.

$$\text{Mag}B_9 := \sqrt{(\text{Re}(B_4))^2 + (\text{Re}(B_8))^2 + (\text{Im}(B_4))^2 + (\text{Im}(B_8))^2} = 1.218 \times 10^{-4}$$

Siendo:

$\text{Re}(B_4)$: Parte real de B_4

$\text{Re}(B_8)$: Parte real de B_8

$\text{Im}(B_4)$: Parte imaginaria de B_4

$\text{Im}(B_8)$: Parte imaginaria de B_8

$$|B_{Total}| = 121,8 \mu T$$

Una vez se obtiene la contribución al campo magnético en el punto P de la red de 44 kV, ahora se debe determinar el campo generado por los conductores de 13,2 kV en el mismo punto.

- Campo magnético producido por la red con nivel de tensión de 13.2 kV

Se repite el mismo procedimiento que se realizó en 44 kV (cambiando las distancias y demás datos de entrada requeridos) y se obtienen los siguientes resultados:

Eje X

$$B_1 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_1 \cdot (X_1 - D_1)}{(X_1 - D_1)^2 + (h_p - h_1)^2} = -4.943 \times 10^{-6} + 8.562i \times 10^{-6}$$

$$B_2 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_2 \cdot (X_2 - D_2)}{(X_2 - D_2)^2 + (h_p - h_2)^2} = -6.206 \times 10^{-6} - 1.075i \times 10^{-5}$$

$$B_3 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_3 \cdot (X_3 - D_3)}{(X_3 - D_3)^2 + (h_p - h_3)^2} = 1.233 \times 10^{-5}$$

$$B_4 = B_1 + B_2 + B_3$$

Eje Y

$$B_5 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_1 \cdot (hp - h_1)}{(X_1 - D_1)^2 + (hp - h_1)^2} = -2.247 \times 10^{-6} + 3.892i \times 10^{-6}$$

$$B_6 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_2 \cdot (hp - h_2)}{(X_2 - D_2)^2 + (hp - h_2)^2} = -4.433 \times 10^{-6} - 7.678i \times 10^{-6}$$

$$B_7 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_3 \cdot (hp - h_3)}{(X_3 - D_3)^2 + (hp - h_3)^2} = 1.761 \times 10^{-5}$$

$$B_8 = B_5 + B_6 + B_7$$

Siendo,

Re(B₄) : Parte real de B₄

Re(B₈) : Parte real de B₈

Im(B₄) : Parte imaginaria de B₄

Im(B₈) : Parte imaginaria de B₈

De esta forma se obtiene el campo debido a los tres conductores de la red de 13.2 kV en el punto P.

$$MagB_9 := \sqrt{(Re(B_4))^2 + (Re(B_8))^2 + (Im(B_4))^2 + (Im(B_8))^2} = 1.183 \times 10^{-5}$$

El campo magnético total en el punto P se obtiene sumando las componentes en X y en Y de los campos generados por cada línea:

$$\tilde{B}_{Totalx} = (-2,982 - 6,561 - 113,12 - 4,943 - 6,206 + 12,33) - (5,165 - 11,36 + 8,562 - 10,75)i [\mu T]$$

$$\tilde{B}_{Totalx} = 104,76 + 8,38 i [\mu T]$$

$$\tilde{B}_{Totaly} = (-2,247 - 4,433 + 17,61) - (3,892 - 7,678) i [\mu T]$$

$$\tilde{B}_{Totaly} = 10,93 + 3,786 i [\mu T]$$

$$|B_{TotalP}| = 105,728 [\mu T]$$

El valor tolerable para campos magnéticos de acuerdo con el RETIE es 200 μT .

Figura 9 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos

TIPO DE EXPOSICION	INTENSIDAD DE CAMPO ELECTRICO (KV/m)	DENSIDAD DE FLUJO MAGNETICO (μT)
Exposición ocupacional en un día de trabajo de ocho horas	8.3	1000
Exposición del público en general hasta ocho horas continuas	4.16	200

Fuente: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), Bogotá Colombia, 30 de agosto de 2013.

El valor calculado en el punto P es 105,728 μT y se encuentra dentro del límite de exposición tolerable.

8.2.2 Campo magnético en el punto M

El procedimiento para realizar el cálculo en el punto M es igual al que se usó para estimarlo en P, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Campo magnético producido por la red de 44 kV

Eje X:

$$B_1 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_1 \cdot (X_1 - D_1)}{(X_1 - D_1)^2 + (h_p - h_1)^2} = -4.455 \times 10^{-7} + 7.716i \times 10^{-7}$$

$$B_2 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_2 \cdot (X_2 - D_2)}{(X_2 - D_2)^2 + (h_p - h_2)^2} = -2.297 \times 10^{-7} - 3.979i \times 10^{-7}$$

$$B_3 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_3 \cdot (X_3 - D_3)}{(X_3 - D_3)^2 + (h_p - h_3)^2} = 4.759 \times 10^{-8}$$

Eje Y

$$B_5 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_1 \cdot (h_p - h_1)}{(X_1 - D_1)^2 + (h_p - h_1)^2} = 1.063 \times 10^{-6} - 1.841i \times 10^{-6}$$

$$B_6 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_2 \cdot (h_p - h_2)}{(X_2 - D_2)^2 + (h_p - h_2)^2} = 1.206 \times 10^{-6} + 2.089i \times 10^{-6}$$

$$B_7 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_3 \cdot (hp - h_3)}{(X_3 - D_3)^2 + (hp - h_3)^2} = -2.499 \times 10^{-6}$$

Se obtiene el campo debido a los tres conductores de la red de 44 kV en el punto M.

$$\text{Mag}B_9 := \sqrt{(\text{Re}(B_4))^2 + (\text{Re}(B_8))^2 + (\text{Im}(B_4))^2 + (\text{Im}(B_8))^2} = 8.047 \times 10^{-7}$$

$$|B_{Total}| = 0,8047 [\mu T]$$

- Campo magnético producido por la red de 13,2 kV

Eje X

$$B_1 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_1 \cdot (X_1 - D_1)}{(X_1 - D_1)^2 + (hp - h_1)^2} = -1.26 \times 10^{-6} + 2.183i \times 10^{-6}$$

$$B_2 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_2 \cdot (X_2 - D_2)}{(X_2 - D_2)^2 + (hp - h_2)^2} = -9.175 \times 10^{-7} - 1.589i \times 10^{-6}$$

$$B_3 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_3 \cdot (X_3 - D_3)}{(X_3 - D_3)^2 + (hp - h_3)^2} = 9.902 \times 10^{-7}$$

Eje Y

$$B_5 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_1 \cdot (hp - h_1)}{(X_1 - D_1)^2 + (hp - h_1)^2} = 2.435 \times 10^{-6} - 4.218i \times 10^{-6}$$

$$B_6 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_2 \cdot (hp - h_2)}{(X_2 - D_2)^2 + (hp - h_2)^2} = 2.785 \times 10^{-6} + 4.824i \times 10^{-6}$$

$$B_7 := \frac{2 \times 10^{-7} \cdot I_3 \cdot (hp - h_3)}{(X_3 - D_3)^2 + (hp - h_3)^2} = -6.012 \times 10^{-6}$$

Se obtiene el campo magnético debido a los tres conductores de la red de 13,2 kV en el punto M.

$$\text{Mag}B_9 := \sqrt{(\text{Re}(B_4))^2 + (\text{Re}(B_8))^2 + (\text{Im}(B_4))^2 + (\text{Im}(B_8))^2} = 1.661 \times 10^{-6}$$

$$|B_{Total}| = 1.661 [\mu T]$$

El campo magnético total en el punto M se obtiene sumando las componentes en X y en Y de los campos generados por cada línea:

$$\tilde{B}_{Totalx} = (-0,4455 - 0,2297 + 0,04759 - 1,26 - 0,91 - 0,9902) - (0,7716 - 0,3979 + 2,183 - 1,589)i [\mu T]$$

$$\tilde{B}_{Totalx} = -3,7953 - 0,9677 i [\mu T]$$

$$\tilde{B}_{Totaly} = (1,063 + 1,206 - 2,499 + 2,435 + 2,785 - 6,012) - (-1,841 + 2,089 - 4,218 + 4,824) i [\mu T]$$

$$\tilde{B}_{Totaly} = -1,022 + 0,0854 i [\mu T]$$

$$|B_{Total P}| = 4,13698 [\mu T]$$

El valor tolerable para campos magnéticos de acuerdo con el RETIE es 200 μT .

Tabla 5 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos.

TIPO DE EXPOSICION	INTENSIDAD DE CAMPO ELECTRICO (KV/m)	DENSIDAD DE FLUJO MAGNETICO (μT)
Exposición ocupacional en un día de trabajo de ocho horas	8.3	1000
Exposición del público en general hasta ocho horas continuas	4.16	200

Fuente: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), Bogotá Colombia, 30 de agosto de 2013.

El valor calculado en el punto M es 4,13698 μT y se encuentra dentro del límite de exposición tolerable.



ANEXOS

ANEXO A CARACTERÍSTICAS DE LOS CONDUCTORES ELÉCTRICOS EN UNA RED ELÉCTRICA DE DISTRIBUCIÓN

En la Tabla 6 y Tabla 7 se presentan las características de los conductores empleados en la red eléctrica de distribución a evaluar. Estos datos son tomadas de las normas del Grupo EPM ESP.

Tabla 6 Características de conductores ACSR de la red de distribución

Número de hilos Aluminio /Acero	Nombre del conductor y clase de cableado	Hilos de aluminio	Hilos de acero	Diámetro nominal mm y área mm ²	Masa kg/km	Carga de rotura kg	Resistencia DC a 20°C
30/7	LARK AA	2,924	2,924	20,47 - 248,42	927,00	9227	0,139
26/7	IBIS AA	3,139	2,441	19,88 -234,18	813,40	7386	0,14
27/7	BRANT AA	3,269	2,179	19,62 -227,5	762,00	6641	0,141
18/1	CHICKA DE AA	3,744	3,744	18,87 -212,61	642,20	4511	0,142
30/7	ORIOLE AA	2,690	2,690	18,83 -210,24	784,60	7864	0,164
26/7	LINNET AA	2,888	2,245	18,29 - 198,17	688,30	6400	0,165
18/1	MERLIN AA	3,472	3,472	17,36 - 179,73	543,70	3937	0,168
26/7	OSTRICH AA	0,212	2,540	17,78 - 176,74	614,40	7013	0,184
26/7	PARTRIDGE	2,573	2,121	16,30 -157,23	546,80	2120	0,209
18/1	WAXWING AA	3,091	3,091	15,46 - 142,69	430,80	3122	0,212
6/1	PENGUIN AA, A	4,770	4,770	14,31 - 125,09	433,20	3787	0,26
12/7	PGEON AA, A	4,247	4,247	12,74 - 99,2	343,50	3003	0,328
6/1	QUAIL AA, A	3,782	3,782	11,35 - 78,66	272,40	2405	0,414
6/1	RAVEN AA, A	3,371	3,371	10,11 - 62,42	216,30	1985	0,522
6/1	ROBIN AA, A	3,000	3,000	9 - 49,48	171,40	1612	0,658
7/1	SPARATE AA, A	2,462	-				
6/1	SPARROW AA, A	2,672	2,672	8,02 - 39,24	135,90	1290	0,83
7/1	SUANATE AA, A	1,961	-				
6/1	SWAN AA, A	2,118	2,118	6,35 - 24,68	85,40	845	1,32

Nota: En estos casos solo se considera un conductor por fase que será el mismo conductor de la red eléctrica.

Fuente: Norma RA7-229 de EPM ESP.

Tabla 7 Características de conductores AAAC de la red de distribución

Calibre del conductor		Palabra código	Calibre aproximado de resistencia eléctrica equivalente al aluminio 1350			Construcción requerida			
cmils	mm ²		cmil	AWG	mm ²	Número de alambres	Diámetro de los alambres PLG	Diámetro de los alambres mm	Clase
1259600	638		1113000	–	564,0	61	0,1437	3,65	AA
740800	375	Flint	636000	–	322,3	37	0,1415	3,59	AA
559500	284	Darien	477000	–	241,7	19	0,1716	4,36	AA
465400	236	Cairo	397500	–	201,4	19	0,1565	3,98	AA
394500	200	Canton	336400	–	170,5	19	0,1441	3,66	AA
312800	159	Butte	266800	–	135,2	19	0,1283	3,26	AA
246900	125	Alliance	211600	4/0	107,2	7	0,1878	4,77	AA
155400	78,6	Anaheim	133100	2/0	67,4	7	0,149	3,78	AA
123300	62,4	Azusa	105600	1/0	53,5	7	0,1327	3,37	AA
77470	39,2	Ames	66360	2	33,6	7	0,1052	2,67	AA

Nota: En estos casos solo se considera un conductor por fase que será el mismo conductor de la red eléctrica.

Fuente: Norma ET-TD-ME01-01 del Grupo EPM ESP.