

Diseño de un escudo para la atenuación de campos magnéticos de baja frecuencia producidos por cables eléctricos subterráneos

Yeison Fabian Jerez Mosquera

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Director

José David Esparza Gómez

Ingeniero Electricista

Codirector

Óscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Doctor en Ciencias con énfasis en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria**

Primeramente a Dios todo poderoso quien siempre ha estado a mi lado en todo lo que me propongo hacer.

A mis padres quienes con su esfuerzo me apoyaron en esta etapa de mi vida para convertirme en profesional.

A todos los profesores de la gloriosa Universidad Industrial de Santander que aportaron en el avance y culminación de mi carrera universitaria brindándome su vasta experiencia.

Al gran número de compañeros que aportaron en mi avance como persona y me permitieron compartir nuevas culturas y formas de pensamiento.

*Yeison Fabian Jerez Mosquera*

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Conceptos básicos de campo magnético.....	14
1.1. Leyes principales del campo magnético .....	14
1.1.1. La ley de Biot-Savart .....	14
1.1.2. La ley de Ampère.....	15
1.2. Campos magnéticos de baja frecuencia en instalaciones eléctricas.....	16
1.2.1. Límites normativos para exposición a campos magnéticos.....	17
1.2.1.1. Cálculo de campos magnéticos basado en la normatividad.....	20
1.2.1.2. Medición de campos magnéticos basado en la normatividad.....	21
1.2.1.2.1. Equipos de medición de campos magnéticos.....	22
2. Definición de casos de estudio.....	23
2.1. Composición del cableado .....	25
2.2. Ficha técnica del cableado .....	29
2.3. Medidas de instalación.....	33
2.4. Tipo y medidas de la tubería.....	36
3. Simulación del campo magnético .....	39
3.1. Programa de simulación COMSOL Multiphysics .....	40
3.2. Simulación casos de estudio .....	42
3.3. Resultados simulación de casos de estudio.....	48
4. Diseño del escudo .....	58

4.1. Teoría de blindajes .....	59
4.2. Diseño y selección del escudo .....	62
4.2.1. Técnicas de apantallamiento .....	62
4.2.2. Material para el diseño del blindaje .....	63
4.2.3. Propuesta de diseño de escudo en cada caso de estudio .....	64
4.3. Resultados de simulación con el escudo .....	69
5. Análisis de resultados finales .....	77
Conclusiones .....	80
Referencias bibliográficas .....	82

### Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Ecuación de la ley de Biot-Savart. ....	15
<b>Figura 2.</b> Ecuación de la ley de Ampère. ....	16
<b>Figura 3.</b> Medidor de campos electromagnéticos SPECTRAN, modelo NF-5035S. ....	23
<b>Figura 4.</b> Diagrama unifilar de la instalación. ....	24
<b>Figura 5.</b> Elementos que conforman el cable eléctrico subterráneo XLPE. ....	25
<b>Figura 6.</b> Elementos que conforman el cable eléctrico THWN 8 AWG y 1000 kcmil. ....	29
<b>Figura 7.</b> Conductor 2 AWG, vista de corte y vista de perfil. ....	30
<b>Figura 8.</b> Conductor 1000 kcmil, vista de corte y vista de perfil. ....	31
<b>Figura 9.</b> Conductor 8 AWG, vista de corte y vista de perfil. ....	32
<b>Figura 10.</b> Medidas y relleno para instalación de cable subterráneo de 13.2 kV en anden. ....	34
<b>Figura 11.</b> Caja para acometidas y salidas de circuitos a 13.2 kV. ....	35
<b>Figura 12.</b> Tapa para caja de acometidas de norma RS3-005. ....	36
<b>Figura 13.</b> Plano arquitectónico de la fachada del edificio. ....	38
<b>Figura 14.</b> Plano arquitectónico con corte del interior del edificio. ....	38
<b>Figura 15.</b> Simulación del campo magnético para un cable eléctrico subterráneo usando FlexPDE7. ....	39
<b>Figura 16.</b> Simulación del campo magnético en cable eléctrico subterráneo usando FlexPDE7. ....	40
<b>Figura 17.</b> COMSOL Multiphysics método de elementos finitos en dos dimensiones. ....	42
<b>Figura 18.</b> Configuración de zonas de instalación según norma RS1-006 para el caso uno. ....	43
<b>Figura 19.</b> Configuración de las propiedades de cada material en las zonas de instalación para el caso uno. ....	44

<b>Figura 20.</b> Configuración del cableado dentro de la tubería, sistema trifásico por cada circuito para el caso uno.....	45
<b>Figura 21.</b> Configuración de las propiedades de cada material del cableado y la tubería para el caso uno. ....	46
<b>Figura 22.</b> Configuración de las propiedades de cada material en la zona de instalación para el caso dos.....	46
<b>Figura 23.</b> Configuración de las propiedades de cada material en la zona de instalación para el caso tres.....	47
<b>Figura 24.</b> Configuración de las propiedades de cada material en la zona de instalación para el caso cuatro. ....	48
<b>Figura 25.</b> Líneas de flujo magnético obtenidas en la simulación con el software COMSOL para el caso uno.....	49
<b>Figura 26.</b> Concentración del flujo magnético en los conductores, simulación con el software COMSOL para el caso uno.....	50
<b>Figura 27.</b> Gráfica de la magnitud del flujo magnético en diferentes puntos para el caso uno. ..	51
<b>Figura 28.</b> Líneas de flujo magnético obtenidas en la simulación con el software COMSOL para el caso dos.....	52
<b>Figura 29.</b> Gráfica de la magnitud del flujo magnético en diferentes puntos para el caso dos. ..	53
<b>Figura 30.</b> Líneas de flujo magnético obtenidas en la simulación con el software COMSOL para el caso tres.....	54
<b>Figura 31.</b> Gráfica de la magnitud del flujo magnético en diferentes puntos para el caso tres. ..	55
<b>Figura 32.</b> Líneas de flujo magnético obtenidas en la simulación con el software COMSOL para el caso cuatro.....	56

<b>Figura 33.</b> Gráfica de la magnitud del flujo magnético en diferentes puntos para el caso cuatro. .....	57
<b>Figura 34.</b> Ubicación de la lámina para el caso uno. ....	70
<b>Figura 35.</b> Gráfica de la mitigación del flujo magnético en diferentes puntos para el caso uno. 71	
<b>Figura 36.</b> Ubicación de la lámina para el caso dos.....	72
<b>Figura 37.</b> Gráfica de la mitigación del flujo magnético en diferentes puntos para el caso dos. 73	
<b>Figura 38.</b> Gráfica de la mitigación del flujo magnético en diferentes puntos para el caso tres con cambio de tubería. ....	74
<b>Figura 39.</b> Ubicación de la lámina para el caso tres. ....	75
<b>Figura 40.</b> Gráfica de la mitigación del flujo magnético en diferentes puntos para el caso tres. 76	

**Lista de tablas**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Valores límites de exposición de intensidad de campo eléctrico y densidad de flujo magnético.....	18
<b>Tabla 2.</b> Niveles máximos de exposición a campos magnéticos definidos en la norma IEEE Std C95.6-2002.....	19
<b>Tabla 3.</b> Niveles máximos de exposición a campos magnéticos definidos en ICNIRP.....	19
<b>Tabla 4.</b> Medición de campos electromagnéticos en redes subterráneas. ....	22
<b>Tabla 5.</b> Comparativo de diferentes materiales usados en la fabricación de chaquetas para cables eléctricos. ....	26
<b>Tabla 6.</b> Características de materiales usados en la fabricación de aislamientos. ....	27
<b>Tabla 7.</b> Propiedades de materiales utilizados en la fabricación de conductores. ....	28
<b>Tabla 8.</b> Características conductor 2 AWG. ....	30
<b>Tabla 9.</b> Características conductor 1000 kcmil.....	31
<b>Tabla 10.</b> Características conductor 8 AWG. ....	32
<b>Tabla 11.</b> Tubos de PVC CONDUIT tipo industrial SCH 40.....	37
<b>Tabla 12.</b> Propiedades específicas de materiales de relleno usados para la simulación. ....	43
<b>Tabla 13.</b> Propiedades específicas de materiales del cableado y la tubería usados para la simulación. ....	45
<b>Tabla 14.</b> Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 27.....	51
<b>Tabla 15.</b> Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 29.....	53
<b>Tabla 16.</b> Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 31.....	55
<b>Tabla 17.</b> Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 33.....	57

<b>Tabla 18.</b> Efectividad de blindajes según el tipo de material.....	60
<b>Tabla 19.</b> Propiedades de los materiales para el blindaje. ....	64
<b>Tabla 20.</b> Especificaciones y resultados obtenidos en el software MATLAB de cada material para el caso uno.....	66
<b>Tabla 21.</b> Especificaciones y resultados obtenidos en el software MATLAB de cada material para el caso dos. ....	67
<b>Tabla 22.</b> Especificaciones y resultados obtenidos en el software MATLAB de cada material para el caso tres.....	68
<b>Tabla 23.</b> Propiedades específicas de materiales para el escudo a utilizar en la simulación. ....	69
<b>Tabla 24.</b> Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 35.....	71
<b>Tabla 25.</b> Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 37.....	73
<b>Tabla 26.</b> Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 38.....	74
<b>Tabla 27.</b> Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 40.....	76
<b>Tabla 28.</b> Tabla comparativa de resultados para el caso uno.....	77
<b>Tabla 29.</b> Tabla comparativa de resultados para el caso dos. ....	78
<b>Tabla 30.</b> Tabla comparativa de resultados para el caso tres con cambio de tubería.....	79
<b>Tabla 31.</b> Tabla comparativa de resultados para el caso tres con instalación de la lámina. ....	79

## Resumen

**Título:** Diseño de un escudo para la atenuación de campos magnéticos de baja frecuencia producidos por cables eléctricos subterráneos\*.

**Autor:** Yeison Fabian Jerez Mosquera\*\*

**Palabras claves:** Cables Subterráneos, campos magnéticos, mitigación, blindaje, efectos negativos para la salud.

### Descripción:

El cableado eléctrico subterráneo genera campos magnéticos de baja frecuencia a lo largo de su trayectoria, los cuales tienen consecuencias en la salud y afectaciones en equipos eléctricos y electrónicos. El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas en su artículo 14 y la IEEE C95.6-2002, incluyen valores límites de exposición para el público en general, con respecto a campos electromagnéticos. Este trabajo busca diseñar, por medio de una simulación en el software COMSOL Multiphysics, un escudo para la mitigación del campo magnético producido por una línea eléctrica subterránea. Para ello, se realiza, en primer lugar, un marco teórico; luego, se hace la primera simulación, analizando diversos casos de estudio; paso seguido, se diseña el escudo correspondiente; y por último, se evalúa la calidad y la eficacia del diseño del blindaje. De esta manera, se cumplen estándares establecidos en la normatividad y se protege la salud del público en general.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Director: José David Esparza Gómez Ingeniero Electricista

Codirector: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga Doctor en Ciencias con énfasis en Ingeniería Eléctrica

### Abstract

**Title:** Design of a shield for the attenuation of low-frequency magnetic fields produced by underground electrical cables\*.

**Author:** Yeison Fabian Jerez Mosquera\*\*

**Key Words:** Underground cables, magnetic fields, mitigation, shielding, negative health effects.

#### Description:

Underground electrical wiring generates low-frequency magnetic fields along its path, which have health consequences and affect electrical and electronic equipment. The Technical Regulation of Electrical Installations in its article 14 and the IEEE C95.6-2002, include exposure limit values for the general public, with respect to electromagnetic fields. This work seeks to design, through a simulation in the COMSOL Multiphysics software, a shield for the mitigation of the magnetic field produced by an underground power line. To do this, a theoretical framework is first carried out; then, the first simulation is done, analyzing various case studies; next step, the corresponding shield is designed; and finally, the quality and effectiveness of the armor design is evaluated. In this way, standards established in the regulations are met and the health of the general public is protected.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering.

Director: José David Esparza Gómez Electrical Engineer

Co-director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga Doctor of Science with emphasis in Electrical Engineering

## Introducción

El creciente aumento de la población en las diferentes ciudades ha traído como consecuencia una alta demanda de energía eléctrica, provocando un crecimiento de las redes de distribución eléctrica de media y baja tensión, especialmente las subterráneas, las cuales ofrecen un ambiente más estético y seguro para el público en general, pero exponiéndolos en gran medida a una radiación invisible y silenciosa, los campos electromagnéticos; por tal motivo ha aumentado de igual forma el interés por los efectos de la exposición a campos magnéticos de baja frecuencia en la salud humana y la susceptibilidad de equipos eléctricos y electrónicos a interferencias electromagnéticas generadas por estas líneas eléctricas subterráneas. Muchos países establecen sus límites permisibles de exposición a campos eléctricos y magnéticos, siguiendo estándares internacionales o estudios científicos; en Colombia el reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE) ha definido límites máximos de exposición a los campos electromagnéticos siguiendo estándares internacionales, pero no ha realizado estudios actualizados para la modificación de estos valores y su posterior atenuación, por tal motivo operadores de red y diseñadores, han tenido que incorporar en sus proyectos diferentes alternativas de mitigación del valor del campo magnético que se ha medido o calculado con anterioridad por posibles efectos en la salud al público en general o por fallas en equipos eléctricos o electrónicos cercanos.

El presente proyecto tiene como objetivo principal el diseño de un escudo para la mitigación de campos magnéticos de baja frecuencia producido por cables eléctricos subterráneos para diferentes casos de estudio, usando como herramienta principal el software de simulación COMSOL Multiphysics y la ayuda que nos ofrece la teoría electromagnética para el modelamiento de estos fenómenos de acoplamiento electromagnético y la forma de atenuarlos o eliminarlos. Se buscara cumplir estándares normativos primeramente nacionales pero se atenderán sugerencias de

normas internacionales que hayan realizados estudios más recientes para la modificación de sus valores límites de exposición a estos campos magnéticos.

Para la finalización exitosa del proyecto primero se realizará una revisión de la normatividad nacional e internacional en cuanto a valores límites, cálculo y medición de campos magnéticos en cableado subterráneo. Posteriormente se definirán los diversos casos de estudio para la realización del diseño del escudo con la ayuda del software de simulación, contemplando las diferentes características en cuanto al lugar de instalación y el tipo de cableado a utilizar. Finalmente se evaluará el desempeño de la propuesta de blindaje obtenido para cada caso de estudio incorporándolo en la simulación para su posterior instalación futura.

## 1. Conceptos básicos de campo magnético

Debido al flujo de electricidad en los conductores que transportan energía eléctrica, se crean campos eléctricos y magnéticos junto a estos y alrededor de los dispositivos que consumen energía. Podemos definir el concepto de campo como aquellos casos donde existe la capacidad de ejercerse una fuerza. El campo gravitatorio, por ejemplo, describe la fuerza ejercida sobre una unidad de masa para cada punto en el espacio. De forma similar, el campo eléctrico describe la fuerza ejercida sobre una unidad de carga eléctrica, y el campo magnético se define en términos de la fuerza ejercida sobre una unidad de carga en movimiento (Ruz et al., 2010). Los campos eléctricos y magnéticos se pueden representar por líneas de fuerza que los rodean y decrecen a medida que aumenta la distancia en relación a la fuente.

Para los campos magnéticos se utilizan dos parámetros: la densidad de flujo magnético, designada por  $B$  y cuyas unidades son Tesla (T), y la intensidad de campo magnético, designada por  $H$  y su unidad más utilizada especialmente en el ámbito estadounidense es el Gauss (G), siendo  $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$  ( $1 \mu\text{T} = 10 \text{ mG}$ ) (Ruz et al., 2010). Existen campos magnéticos naturales, como el campo magnético terrestre, este documento se centra en los campos magnéticos producidos de forma artificial en el transporte de energía eléctrica por cables subterráneos.

### 1.1. Leyes principales del campo magnético

En el estudio del campo magnético se definen dos leyes principales entre las que podemos mencionar:

#### 1.1.1. La ley de Biot-Savart

Establece que en cualquier punto la magnitud de la intensidad de campo magnético que produce el elemento diferencial es proporcional al producto de la corriente, la magnitud del diferencial de longitud y el seno del ángulo formado entre el filamento y la línea que lo conecta

con el punto en donde se busca el campo (Hayt y Buck, 2006, p. 211). Las siguientes son las ecuaciones para corrientes que circulan por distribuciones lineales, superficiales y volumétricas.

### Figura 1

*Ecuación de la ley de Biot-Savart.*

$$H = \int_L \frac{Idl \times a_R}{4\pi R^2} \quad (\text{Corriente de línea})$$

$$H = \int_S \frac{KdS \times a_R}{4\pi R^2} \quad (\text{Corriente superficial})$$

$$H = \int_V \frac{Jdv \times a_R}{4\pi R^2} \quad (\text{Corriente volumétrica})$$

Nota. Información tomada de Sadiku M. (2002). *Elementos de electromagnetismo*. Oxford University.

#### 1.1.2. La ley de Ampère

Establece que la integral de línea de la intensidad del campo magnético sobre cualquier trayectoria cerrada es exactamente igual a la corriente encerrada por dicha trayectoria (Hayt y Buck, 2006, p. 218). La siguiente es la ecuación de manera integral y vectorial, esta ley posteriormente fue corregida por James Clerk Maxwell que introdujo la corriente de desplazamiento, creando una versión generalizada de la ley e incorporándola a las ecuaciones de Maxwell.

**Figura 2**

*Ecuación de la ley de Ampère.*

$$\oint \mathbf{H} * d\mathbf{l} = I_{\text{enc}}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

Nota. Información tomada de Sadiku M. (2002). *Elementos de electromagnetismo*. Oxford University.

**1.2. Campos magnéticos de baja frecuencia en instalaciones eléctricas**

Los campos electromagnéticos abarcan una amplia gama de frecuencias (0 Hz – 300 GHz), entre ellas se distinguen las siguientes: campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas (ELF) (1 Hz – 1 kHz), radiofrecuencias (1 MHz – 1 GHz) y microondas (1 GHz – 300 GHz) (Alonso et al., 2011). Las instalaciones como los transformadores y líneas de alta tensión generan campos electromagnéticos de baja frecuencia, emisiones producidas a la frecuencia de la red eléctrica 50 Hercios (50 Hz) para Europa y otros países y 60 Hercios (60 Hz) para América (Solano y Sáiz, s.f.). Desde los años sesenta en la antigua Unión Soviética, se planteó la hipótesis, sobre si la exposición a los campos magnéticos y eléctricos de muy baja frecuencia tiene consecuencias adversas para la salud, después que los científicos Asanova y Rakov reportaran la aparición de síntomas neurológicos en trabajadores de grandes centrales eléctricas (Revueltas y Gutiérrez, 2017). En la actualidad los estudios realizados no son concluyentes debido al alto nivel de incertidumbre, provocando que no se planteen políticas dirigidas a la protección de las personas en muchos países. En mayo de 1992 se crea una organización científica independiente, la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), que tiene entre sus funciones, la investigación de los peligros asociados con las diferentes formas de radiaciones no

ionizantes, desarrollar recomendaciones sobre límites de exposición y los aspectos sobre la protección. (Revueltas y Gutiérrez, 2017).

En estudios de laboratorio se ha encontrado evidencia limitada sobre los efectos perjudiciales en la salud humana que generan los campos electromagnéticos de baja frecuencia que son producidos por líneas de energía eléctrica o transformadores. Algunos estudios han determinado un efecto en la frecuencia cardiaca debido a la exposición de campos electromagnéticos, indicando una disminución de aproximadamente cinco latidos por minuto, estos efectos se produjeron a niveles de exposición de aproximadamente  $30 \mu\text{T}$  (Ruz et al., 2010). En un estudio de laboratorio se encontró que la exposición a los campos magnéticos de 60 Hz en horas de la noche podía alterar la actividad eléctrica cerebral durante el sueño, los implicados fueron expuestos a campos magnéticos continuos o intermitentes de  $28.3 \mu\text{T}$  (Ruz et al., 2010). En algunos estudios se ha comprobado una reducción en los niveles de melatonina segregados durante la noche en animales que han sido expuestos a campos magnéticos y eléctricos, lo cual plantea la hipótesis sobre si esta exposición a campos electromagnéticos puede debilitar las defensas del cuerpo humano contra el cáncer (Ruz et al., 2010).

Otra de las razones por las cuales se hace importante el estudio del campo magnético es por la susceptibilidad de componentes y circuitos electrónicos. Cuando los cables de alimentación son rodeados por un campo magnético producirá un acoplamiento magnético, generando una variación en la tensión de alimentación del circuito, trayendo como consecuencia deterioro del equipo, y respuestas erróneas en la señal de salida (Burgos y Lobelo, 2004).

### ***1.2.1. Límites normativos para exposición a campos magnéticos***

En Colombia el reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) define en su artículo 14 los valores límites de exposición de intensidad de campo eléctrico y densidad de flujo

magnético en baja frecuencia, para las zonas donde puedan permanecer personas, estos están basados en criterios de la OMS y la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (International Commission on Non-Ionizing Radiation, ICNIRP).

En la siguiente tabla se detallan estos límites de exposición definidos en el RETIE, especificando que el cálculo y medición de estos campos electromagnéticos se realizan para diseños de líneas o subestaciones de tensión superior a 57.5 kV y la densidad de flujo magnético se debe calcular para corrientes mayores a 1000 A (Ministerio de Minas y Energía, 2013).

**Tabla 1**

Valores límites de exposición de intensidad de campo eléctrico y densidad de flujo magnético.

Tipo de exposición	Intensidad de campo eléctrico (kV/m)	Densidad de flujo magnético ( $\mu$ 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

Nota: Tabla tomada de Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Anexo General Reglamento Técnico de instalaciones eléctricas RETIE*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energía.

La normatividad internacional es más rigurosa para este tipo de estudios y normas como la IEEE Std C95.6-2002 y la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (International Commission on Non-Ionizing Radiation, ICNIRP) detallan los siguientes niveles máximos de exposición a estos campos electromagnéticos.

**Tabla 2**

Niveles máximos de exposición a campos magnéticos definidos en la norma IEEE Std C95.6-2002.

Rango de frecuencia (Hz)	Público en general		Ambiente controlado	
	B – rms (mT)	H – rms (A/m)	B – rms (mT)	H - rms (A/m)
< 0.153	118	$9.39 \times 10^4$	353	$2.81 \times 10^5$
0.153–20	18.1/f	$1.44 \times 10^4/f$	54.3/f	$4.32 \times 10^4/f$
20–759	0.904	719	2.71	$2.16 \times 10^3$
759–3000	687/f	$5.47 \times 10^5/f$	2060/f	$1.64 \times 10^6/f$

Nota. Tabla tomada de IEEE-SA Standards Board. (2002). *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0–3 kHz*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

**Tabla 3**

Niveles máximos de exposición a campos magnéticos definidos en ICNIRP.

Tipo de exposición	Rango de frecuencias (Hz)	Densidad de flujo magnético ( $\mu$ T)
Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos magnéticos.	25 – 300 Hz	1000
Niveles de referencia para exposición poblacional a campos magnéticos.	25 – 300 Hz	200

Nota. Tabla tomada de International commission on non-ionizing radiation protection. (2010). *ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz)*. Health Physics 99(6):818-836.

En países Europeos se siguen normas como UNE-ENV 50166-1, que contiene límites de exposición de 100  $\mu\text{T}$  para público en general y hasta 500  $\mu\text{T}$  para trabajadores (Kunsch, 1996), dichos valores son basados en los estándares del Consejo de la Unión Europea (IRPA-CENELEC), pero estos niveles de referencia no son aceptados por países modernos como Suecia, Suiza e Italia. La ley Italiana establece valores límites de exposición a campos magnéticos de la siguiente manera: 100  $\mu\text{T}$  como límite de exposición para proteger contra posibles efectos a corto plazo; 10  $\mu\text{T}$  como valor de atención y 3  $\mu\text{T}$  como objetivo de calidad para la protección de posibles efectos a largo plazo asociados con la exposición en áreas residenciales, entornos escolares, áreas recreativas para niños y lugares donde las personas permanecen al menos cuatro horas al día (El Presidente del Consiglio dei Ministri, 2003). De igual forma el Organismo Suizo de Medio Ambiente ha decidido fijar normativas más estrictas con un límite de exposición de 1  $\mu\text{T}$ , para los campos magnéticos admisibles en áreas de trabajo y residenciales (Burgos y Lobelo, 2004), esta cifra es 100 veces menor que las fijadas en otras normas, pero la organización afirma que su decisión se fundamenta en que "nuestra tarea es proteger al público, no sólo de aquellos agentes que se sabe son nocivos, sino también de aquellos que podrían ser nocivos" (Burgos y Lobelo, 2004).

#### **1.2.1.1. Cálculo de campos magnéticos basado en la normatividad**

En cuanto al Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050) y la Norma técnica de la Electrificadora de Santander (ESSA), no exigen estudios de campos electromagnéticos para los proyectos que se presenten para su ejecución, sin embargo el grupo EPM (Empresa de Servicios Públicos de Medellín) del cual hace parte la ESSA cuenta con la guía EPM-UCET-NYL-GM-07 la cual define el procedimiento para el cálculo de campos electromagnéticos en redes de distribución 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 (Empresas

Públicas De Medellín ESP, 2019). Normas de otras electrificadoras fuera del área de influencia de la ESSA si exigen este estudio como lo son la Empresa de Energía del Casanare (ENERCA) que define el estudio de valores de campos electromagnéticos en áreas de trabajo permanente contemplados en el RETIE (Empresa de Energía del Casanare S.A. E.S.P., 2017). Las normas mencionadas no cuentan con documentación sobre el cálculo para campos electromagnéticos en redes de distribución subterránea debido a que la mayoría de los proyectos presentados se apoyan en la medición en campo con equipos especializados para la obtención inmediata de los valores de exposición a estos campos.

#### **1.2.1.2. Medición de campos magnéticos basado en la normatividad**

Para la medición de los campos electromagnéticos el grupo EPM cuenta con la guía EPM-UCET-NYL-NT-07 el cual establece la metodología para la medición de campos electromagnéticos en redes de distribución aérea, el equipo con el que se realicen las mediciones debe poseer un certificado de calibración vigente y estar sometido a un control metrológico (Empresas Públicas De Medellín ESP, 2019), pero en Colombia no existe una guía para la medición de campos electromagnéticos en redes subterránea, el RETIE define en su artículo 14, párrafo 2 que la medición del flujo magnético se realice sobre bandejas portacables, buses de barras y otros cables prearmados que transporten 1000 A de corriente y estén ubicados hasta 30 cm de lugares de trabajo o de permanencia de personas (Ministerio de Minas y Energía, 2013). Para redes de distribución debe medirse a partir de las distancias de seguridad en zonas de amplia circulación del público (Ministerio de Minas y Energía, 2013). En un estudio realizado por la Universidad del Valle en líneas de distribución subterránea de la Empresa de Energía del Pacífico (ESAP) en el departamento del Valle del Cauca para líneas de 34.5 kV y 13.2 kV se realizó la medición del campo magnético a dos diferentes alturas, arrojando los siguientes resultados:

**Tabla 4***Medición de campos electromagnéticos en redes subterráneas.*

Línea subterránea	Máximo 0 metros ( $\mu\text{T}$ )	Máximo 1 metros ( $\mu\text{T}$ )
S/E Candelaria (Ctos 1 y 2) 34.5 kV	7.06	1.82
S/E El Recreo (Ctos 1 y 4) 13.2 kV	0.83	0.58
S/E El Recreo (Ctos 3) 13.2 kV	5.5	0.81
S/E La Dolores (Ctos 1 y 2) 13.2 kV	6.64	0.43
S/E Norte (Ctos 6 y 10) 13.2 kV	7.98	0.96
S/E Ortigal (Ctos 1 y 2) 13.2 kV	7.82	1
S/E Palo Blanco (Ctos 7 y 9) 13.2 kV	0.62	0.26
S/E Pance (Ctos 1 y 4) 13.2 kV	11.5	1.64
S/E Pradera (Ctos 1 y 3) 13.2 kV	14.86	0.99
S/E Rozo (Ctos 1 y 2) 13.2 kV	7.84	0.38

Nota. Tabla tomada de Aponte Mayor G. *La experiencia en Colombia sobre los campos eléctricos y magnéticos en sistemas eléctricos*. Universidad del Valle. Grupo de investigación en alta tensión GRALTA.

Debido a que nuestro estudio se realizará para instalaciones de uso final se tomará como referencia la medida de 30 cm sobre el nivel del piso tanto para líneas de distribución como para cableado interno, siguiendo los lineamientos del RETIE.

#### ***1.2.1.2.1. Equipos de medición de campos magnéticos***

Los medidores de campo magnético cuentan con una sonda para la detección del campo y el detector que procesa la señal indicando su valor rms en una pantalla analógica o digital, estos miden el componente del vector de campo magnético oscilante o giratorio que es perpendicular al área de la sonda. Las sondas consisten en una bobina de alambre blindada y se utilizan en combinación con un voltímetro como detector para mediciones de campo magnético en líneas

eléctricas (IEEE Standards Board, 1995). Uno de los equipos utilizados para la medición de campos electromagnéticos por la empresa EVALCON SAS es el equipo ARONIA AG SPECTRAN, modelo NF-5035S (EVALCON SAS, 2019), este medidor es portátil y reemplaza los antiguos equipos analizadores portátiles, cuyo manejo resultaba muy complejo, estos equipos permiten la visualización de las señales analizadas en tiempo real trabajando con un método de medición selectivo en frecuencia, llamado análisis espectral, cuenta además con un software para la visualización y análisis en tiempo real de las señales (Aaronia AG, 2015).

### Figura 3

*Medidor de campos electromagnéticos SPECTRAN, modelo NF-5035S.*



Nota. Imagen tomada de Aaronia AG. (2015). *Analizadores de espectro para campo E y H. Línea SPECTRAN® NF.*

## 2. Definición de casos de estudio

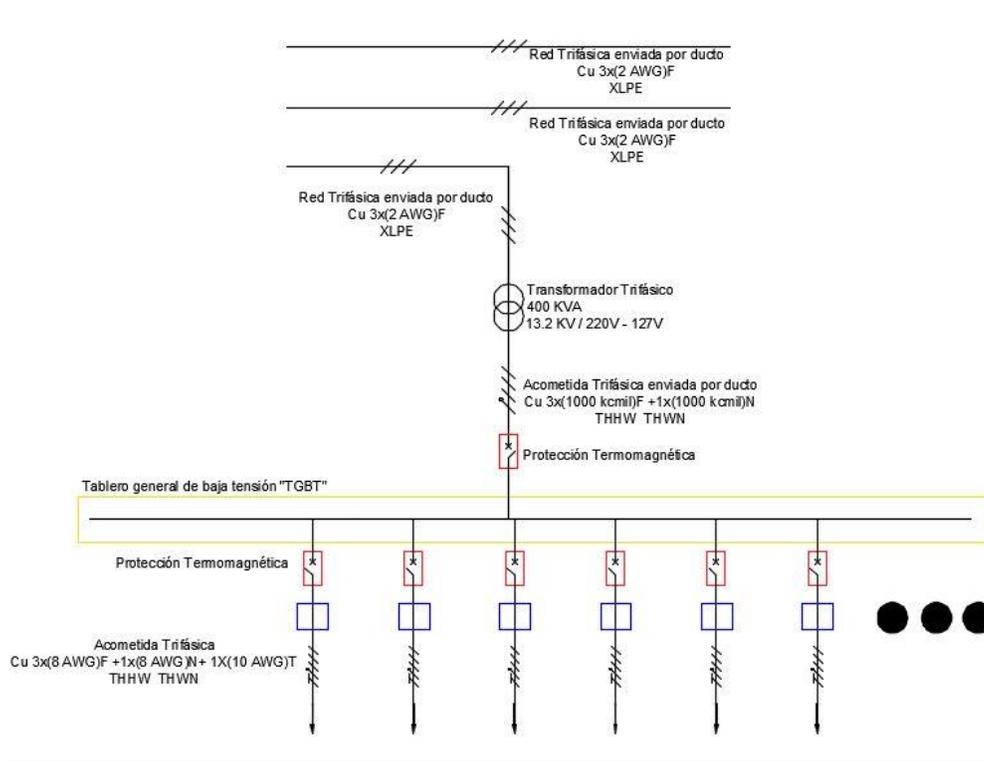
El desarrollo del proyecto se llevará a cabo en el área de influencia de la Electrificadora de Santander (ESSA), por tal motivo se tendrán en cuenta valores establecidos en su norma técnica. Para el inicio se dispondrán de dos casos de estudio específicos los cuales serán: el nivel de tensión nominal de diseño usados en distribución de energía eléctrica en media tensión, dicho nivel se detallan en la norma técnica ESSA tabla 2.2, de esta tabla se dispondrá del nivel de 13.2 kV (ESSA, s.f. p. 11), de este nivel de tensión se llegará a un transformador 13.2 / 0.220-0.127 kV con una potencia de 400 kVA ubicado dentro de un edificio, que alimenta una serie de

apartamentos por medio de una acometida trifásica que se derivan del tablero general de baja tensión.

Con los niveles de tensión de estudio se procede a la selección del tipo y el calibre del conductor a utilizar basados en la tabla 3.13 de la norma técnica ESSA, esta nos indica que para instalaciones subterráneas urbanas o rurales de media tensión se usará cable de cobre de polietileno de cadena cruzada o XLPE (Cross-Linked Polyethylene) calibre 2 AWG para 13.2 kV de la marca CENTELSA, para la acometida a cada piso se usará cable de cobre THWN (Thermoplastic Herat and Water resistance Nylon coated) calibre 8 AWG y para la conexión del transformador con el tablero general de baja tensión se usará cable de cobre THWM calibre 1000 kcmil (ESSA, s.f. p. 41), de la marca NEXANS. La figura 4 nos muestra el diagrama unifilar de dicha instalación.

**Figura 4**

*Diagrama unifilar de la instalación.*

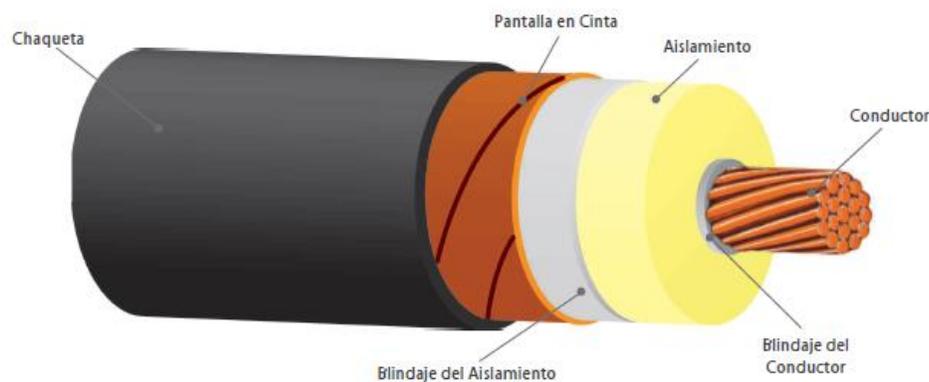


## 2.1. Composición del cableado

En el manual técnico de CENTELSA se evidencia la composición de cada una de las capas que componen el tipo cableado XLPE descritas a continuación:

### Figura 5

*Elementos que conforman el cable eléctrico subterráneo XLPE.*



Nota. Imagen tomada de CENTELSA. (2008). *Cables para media tensión*. Cables y tecnología. Boletín técnico.

Chaqueta: Es el elemento que queda descubierto al ambiente y su función es recubrir el cable, este material debe ser, resistente a la humedad lo cual garantiza que esta no penetre al interior, resistente al fuego para aquellos medios donde se puedan presentar incendios, resistente a los rayos Ultravioleta para instalaciones donde el cable presente alta radiación solar, resistente al impacto o deformaciones en el proceso de instalación o servicio y resistente a elementos externos derivados del petróleo (CENTELSA, 2008). La siguiente tabla presenta el comparativo de los diferentes materiales usados en la fabricación de chaquetas para cables de media tensión.

**Tabla 5**

*Comparativo de diferentes materiales usados en la fabricación de chaquetas para cables eléctricos.*

PROPIEDADES	PVC	PE
Eléctricas	B	E
Flamabilidad	MB	R
Flexibilidad	E	B
Bloqueo Humedad	B	E
Resistencia al Agua	MB	E
Resistencia a la Abrasión	MB	MB
Resistencia a los Hidrocarburos	MB	MB

E: Excelente MB: Muy Bueno B: Bueno R: Regular D: Deficiente

Nota. Tabla tomada de CENTELSA. (2008). *Cables para media tensión*. Cables y tecnología. Boletín técnico.

**Pantalla en cinta de cobre:** Consiste en una pantalla metálica no magnética de cobre que se sitúa sobre el blindaje del aislamiento con el fin de realizar la puesta a tierra, se instala de forma helicoidal sobre el blindaje del aislamiento recubriéndolo en su totalidad (CENTELSA, 2008).

**Blindaje del aislamiento:** Es una capa de material que recubre al aislamiento, está fabricada de polietileno semiconductor y su objetivo es confinar de forma homogénea las líneas del campo eléctrico al interior del aislamiento (CENTELSA, 2008).

**Aislamiento:** El polietileno de cadena cruzada o XLPE (Cross-Linked Polyethylene) es el tipo de material de aislamiento más usado en los cables para media tensión y el caucho de etileno propileno o EPR (Ethylene Propylene Rubber) se emplea en menor proporción, en ambos se les

aplica el proceso de vulcanización, logrando que los materiales sean más termoestables (CENTELSA, 2008).

**Tabla 6**

*Características de materiales usados en la fabricación de aislamientos.*

Características	Unidades	Xlpe	Epr
Rigidez dieléctrica	kV/mm	25	25
Permitividad Eléctrica		2.1	2.3
Factor de Pérdidas (Tangente Delta)	%	0.1	1.5
Constante de Aislamiento	Mohm-km	6100	6100
Resistencia a la Ionización		Buena	Muy Buena
Resistencia a la Humedad		Muy buena	Excelente
Color		Traslúcido opaco	Rojizo
Temperatura de Operación	°C	90	90
Temperatura Máxima de Sobrecarga*	°C	130	130
Temperatura Máxima en Corto circuito**	°C	250	250
Principales Ventajas		Bajo factor de pérdidas	de Flexibilidad

\*Los tiempos de operación en sobrecarga no debe exceder 1500 horas acumuladas durante la vida útil del cable. Adicionalmente es recomendable que los períodos continuos en sobre carga no excedan dos horas.

\*\*Los tiempos de duración de un corto circuito son normalmente menores a un segundo.

Nota. Tabla tomada de CENTELSA. (2008). *Cables para media tensión*. Cables y tecnología. Boletín técnico.

Blindaje del conductor: Este material se encuentra en contacto con el conductor y se encarga de recubrir al conductor, dándole una forma circular al mismo. Este primer material se encarga de que el campo eléctrico sea radial a partir de su superficie, evitando concentraciones

puntuales de campo, obteniéndose así una superficie equipotencial alrededor de esta primera capa (CENTELSA, 2008).

Conductor: Es el encargado de transportar la energía eléctrica, los materiales más usados son el cobre y el aluminio y sus propiedades se detallan en la siguiente tabla.

**Tabla 7**

*Propiedades de materiales utilizados en la fabricación de conductores.*

Propiedades	Unidades	Cobre suave	Aluminio 1350
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	8.89	2.705
Resistividad	$\Omega$ - mm <sup>2</sup> /km	17.241	28.172
Conductividad	(%IACS)	100,0	61.2
Tensión de Rotura	MPa	220	155 - 200
Elongación a Rotura	%	25 - 30	1.4 – 2.3
Norma ASTM (NTC)		B3 (359)	B230 (360)
Resistencia a la Corrosión		Excelente	Buena

Nota. Tabla tomada de CENTELSA. (2008). *Cables para media tensión*. Cables y tecnología. Boletín técnico.

En la ficha técnica de NEXANS se puede evidenciar la composición del cable THWN para el cable calibre 8 AWG y 1000 kcmil.

**Figura 6**

Elementos que conforman el cable eléctrico THWN 8 AWG y 1000 kcmil.



Nota. Imagen tomada de NEXANS. (2016). *Cables alambres Cable Tipo THHN/THWN-2*.  
<http://www.nexans.co>.

Conductor: Hecho en Cobre suave, con cableado concéntrico clase B.

Aislamiento: Construido en Policloruro de Vinilo PVC, retardante a la llama, resistente al calor, a la abrasión y a la humedad.

Chaqueta: Hecho en Nylon, resistente a la gasolina y aceites tipo II.

**2.2. Ficha técnica del cableado**

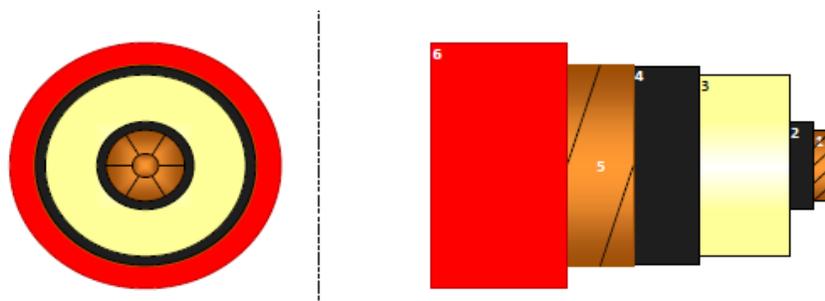
En la ficha técnica de cada cable se detalla la capacidad de corriente y la composición de cada una de las capas que lo componen:

Para el conductor 2 AWG se dispondrá de una capacidad máxima de corriente de 155 A con las siguientes características de composición.

**Tabla 8***Características conductor 2 AWG.*

1. Conductor	Material	Clase Cableado	Área
	Cu	B	33.6 mm <sup>2</sup>
2. Blindaje sobre Conductor	Material	Espesor	Diámetro
	XLPE Semiconductor Extruido	0.15 mm	8.41 mm
3. Aislamiento	Material	Espesor	Diámetro
	XLPE	4.44 mm	17.39 mm
4. Blindaje sobre Aislamiento	Material	Espesor	Diámetro
	XLPE Semiconductor Extruido	0.68 mm	19.07 mm
	Removible		
5. Cinta	Material	Espesor	Diámetro
	Cu	0.064 mm	19.26 mm
6. Chaqueta	Material	Espesor	Diámetro
	PVC SR	1.78 mm	23.54 mm
General	Calibre	Ampacidad	Diámetro
	2 AWG	155 A	23.54 mm

Nota. Información tomada de CENTELSA. (2021). *Hoja Técnica de Diseño. XLPE Cu 2 AWG.*

**Figura 7***Conductor 2 AWG, vista de corte y vista de perfil.*

Nota. Imagen tomada de CENTELSA. (2021). *Hoja Técnica de Diseño. XLPE Cu 2 AWG.*

Para el conductor 1000 kcmil se dispondrá de una capacidad máxima de corriente de 1055 A con las siguientes características de composición.

**Tabla 9**

*Características conductor 1000 kcmil.*

1. Conductor	Material	Clase Cableado	Área
	Cu	B	506.7 mm <sup>2</sup>
3. Aislamiento	Material	Espesor	
	PCV	1.78 mm	
6. Chaqueta	Material	Espesor	
	Nylon	0.23 mm	
General	Calibre	Ampacidad	Diámetro
	1000 kcmil	1055 A	32.62 mm

Nota. Información tomada de NEXANS. (2016). Cables alambres Cable Tipo THHN/THWN-2.

<http://www.nexans.co>.

**Figura 8**

*Conductor 1000 kcmil, vista de corte y vista de perfil.*



Nota. Imagen tomada de NEXANS. (2016). Cables alambres Cable Tipo THHN/THWN-2.

<http://www.nexans.co>.

Para el conductor 8 AWG se dispondrá de una capacidad máxima de corriente de 55 A con las siguientes características de composición.

**Tabla 10**

*Características conductor 8 AWG.*

1. Conductor	Material	Clase Cableado	Área
	Cu	B	8.37 mm <sup>2</sup>
3. Aislamiento	Material	Espesor	
	PCV	0.76 mm	
6. Chaqueta	Material	Espesor	
	Nylon	0.13 mm	
General	Calibre	Ampacidad	Diámetro
	8 AWG	55 A	5.4 mm

Nota. Información tomada de NEXANS. (2016). Cables alambres Cable Tipo THHN/THWN-2.

<http://www.nexans.co>.

**Figura 9**

*Conductor 8 AWG, vista de corte y vista de perfil.*



Nota. Imagen tomada de NEXANS. (2016). Cables alambres Cable Tipo THHN/THWN-2.

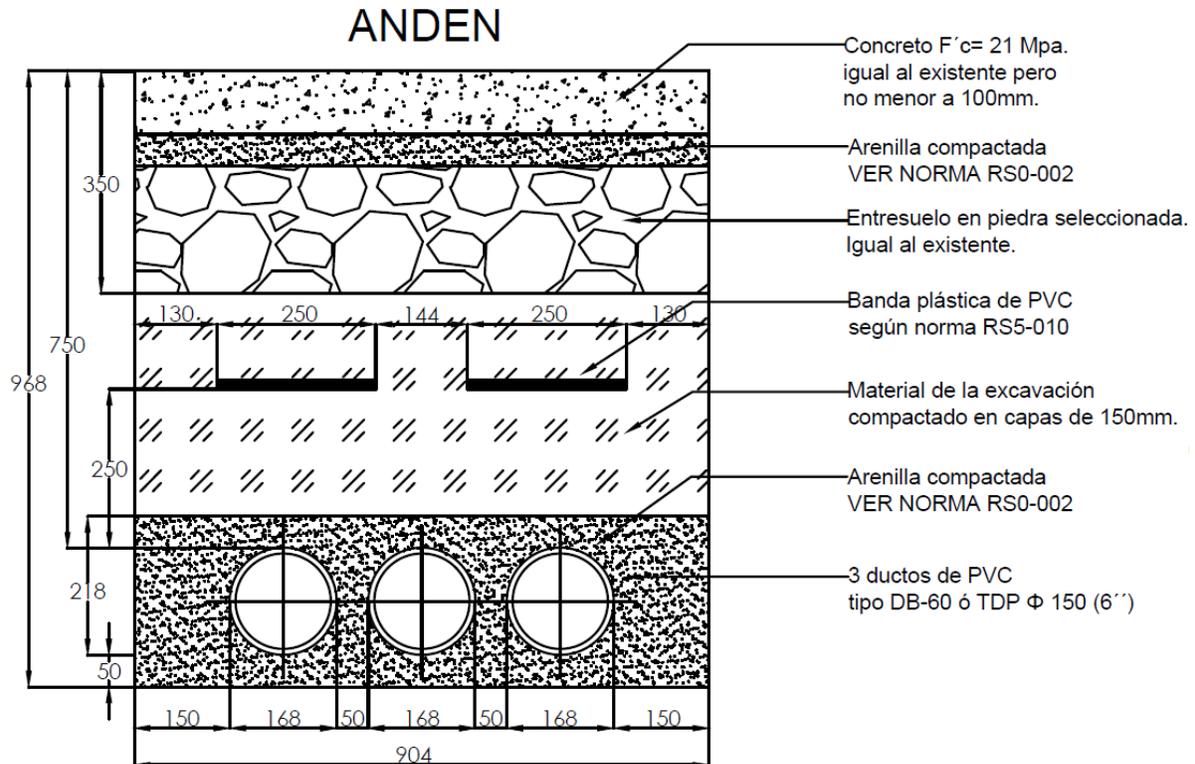
<http://www.nexans.co>.

### 2.3. Medidas de instalación

Para la instalación se tendrá en cuenta la norma para redes subterráneas, RS1-006 para 13.2 kV (Empresas Públicas De Medellín ESP, 2013) del grupo EPM del cual hace parte la ESSA, en el cual se detallan las medidas de enterramiento en diferentes lugares, tomaremos como principal caso de estudio el paso de los conductores por andén, ya que la línea de distribución pasara por el andén presente al frente de la edificación y de ahí llegará a una caja de inspección según especificaciones de la norma RS3-005 de la EPM para entrar a la edificación y llegar finalmente al transformador de 400 kVA, las medidas de enterramiento de las normas se encuentran en milímetros y se detallan las diferentes capas de material que interactúan en el relleno. Para las instalaciones eléctricas internas se dispondrá de una profundidad de enterramiento de 50 cm que será el grosor del hormigón que compone el suelo de los diferentes pisos y de 20 cm para el suelo principal del sótano donde se instala el transformador y el tablero general de baja tensión, estos datos son obtenidos por medio del reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10), el cual es usado por los constructores para el cálculo del espesor del concreto por medio de su tabla C.9.5(a) (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. p. C-70) y la sección C.23-C.15.14 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. p. C-220).

**Figura 10**

*Medidas y relleno para instalación de cable subterráneo de 13.2 kV en anden.*



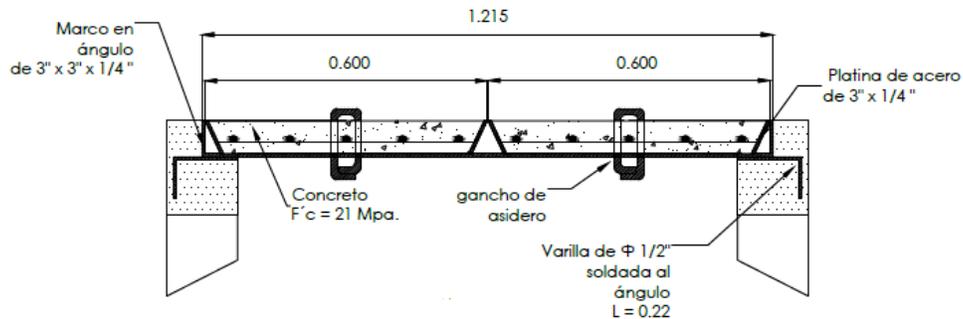
Nota. Imagen tomada de Empresas Públicas De Medellín ESP. (2013). *Normas para redes subterráneas. Canalización de redes de energía 13.2 kV.* Código RS1-006.

Para la caja de inspección de donde se deriva la conexión para el transformador se tomará como se había mencionado anteriormente la norma RS3-005 de la EPM y la norma RS4-001 de la EPM en las cuales se detallan las medidas y materiales de la caja y la tapa que se utiliza con sus medidas en metros.



**Figura 12**

*Tapa para caja de acometidas de norma RS3-005.*



Nota. Imagen tomada de Empresas Públicas De Medellín ESP. (2013). *Normas para redes subterráneas – Tapas para cajas y cámaras - Tapa para norma RS3-005 (zona verde o andén) tapa sencilla en concreto*. Código RS4-001.

**2.4. Tipo y medidas de la tubería**

Con base en la norma de la EPM expuesta en la sección 2.3., de este documento, podemos evidenciar las especificaciones en cuanto a la ductería que alojará el cableado, en el primer caso de estudio para el nivel de tensión de 13.2 kV la ductería debe ser de PVC (Poly Vinyl Chloride) tipo DB-60 o TDP de 6 pulgadas. Para el caso de estudio de nivel de tensión de 220-127 V la ductería será de PVC de 1 pulgada, que alojara el conductor calibre 8 AWG y para los conductores de 1000 kcmil la ductería será de 6 pulgadas, este dato obtenido de la norma ESSA en su tabla 3.10 (ESSA, s.f. p. 39). Para la obtención de las especificaciones de este tipo de tubería nos basaremos en la ficha técnica del fabricante DURMAN el cual nos ofrece las medidas para tubos de PVC CONDUIT tipo industrial SCH 40 de 3 y 6 metros.

**Tabla 11**

*Tubos de PVC CONDUIT tipo industrial SCH 40.*

Diámetro nominal		Espesor de pared		Peso
(mm)	(pulgada)	(mm)	(pulgada)	(kg)
33	1	3.38	0.13	0.5
168	6	7.11	0.28	5.6

Nota. Información tomada de DURMAN. (s.f.). *Tuberías y Accesorios de PVC Conduit.*

[www.durman.com.co](http://www.durman.com.co).

Para la iniciación de la simulación del cableado en el software COMSOL Multiphysics tomaremos los datos técnicos planteados en este capítulo como lo son la composición del cableado y el medio en donde se realiza la instalación, tomando de esta manera los casos puntuales de estudio los niveles de tensión 13.2 kV y 220-127 V cada uno con su respectivo calibre de cable y corriente máxima de transporte. En la figura 13 y 14 se detallan los planos arquitectónicos guía donde se evidencia el paso de los conductores en las diferentes zonas.

En la figura 13 se evidencia el paso del cableado de la línea de 13.2 kV por el andén de la fachada del edificio, ubicando a un costado la caja de inspección que hará la derivación para el transformador.

En la figura 14 se puede observar la instalación eléctrica interna con el cableado entrando al transformador desde la caja de inspección, de ahí sale el cableado para la conexión al tablero general de baja tensión y por último de este sale las acometidas para cada apartamento de los pisos.

**Figura 13**

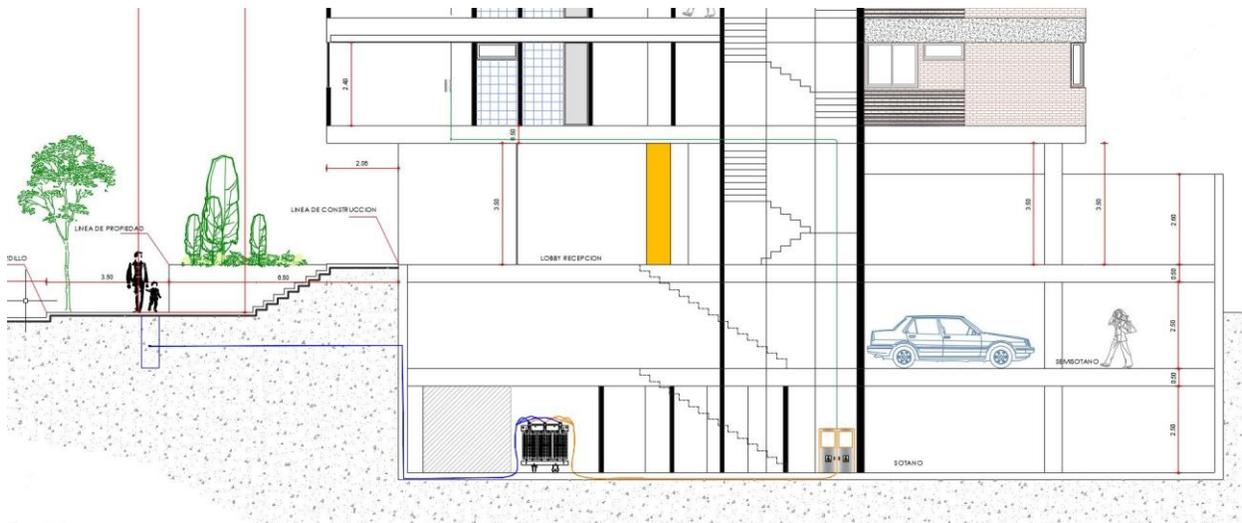
*Plano arquitectónico de la fachada del edificio.*



Nota. Planos guía proporcionados por la empresa MJOR, propiedad del ingeniero electricista Manuel José Ortiz Rangel, profesor catedra vinculado a la Universidad Industrial de Santander.

**Figura 14**

*Plano arquitectónico con corte del interior del edificio.*



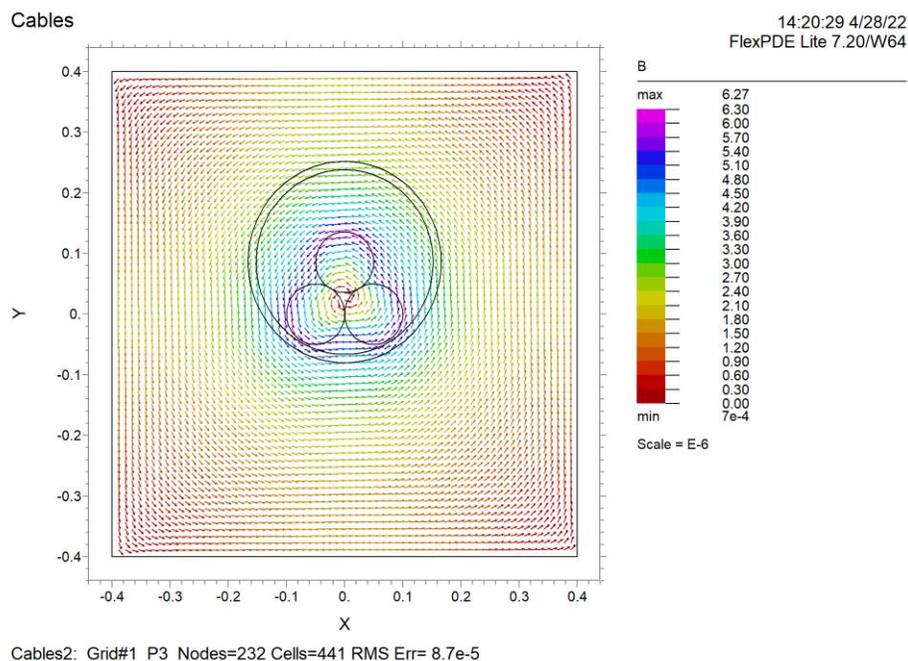
Nota. Planos guía proporcionados por la empresa MJOR, propiedad del ingeniero electricista Manuel José Ortiz Rangel, profesor catedra vinculado a la Universidad Industrial de Santander.

### 3. Simulación del campo magnético

Usando el Software FlexPDE7 (PDE Solutions Inc, 2021) podemos observar el comportamiento de los campos magnéticos con una configuración de tres conductores por fase en un medio, encerrados en una tubería, este programa en su versión Lite es muy limitado para una simulación más robusta como la que realizaremos con COMSOL Multiphysics, pero nos permite observar cómo será el comportamiento del campo magnético y las líneas de flujo magnético.

#### Figura 15

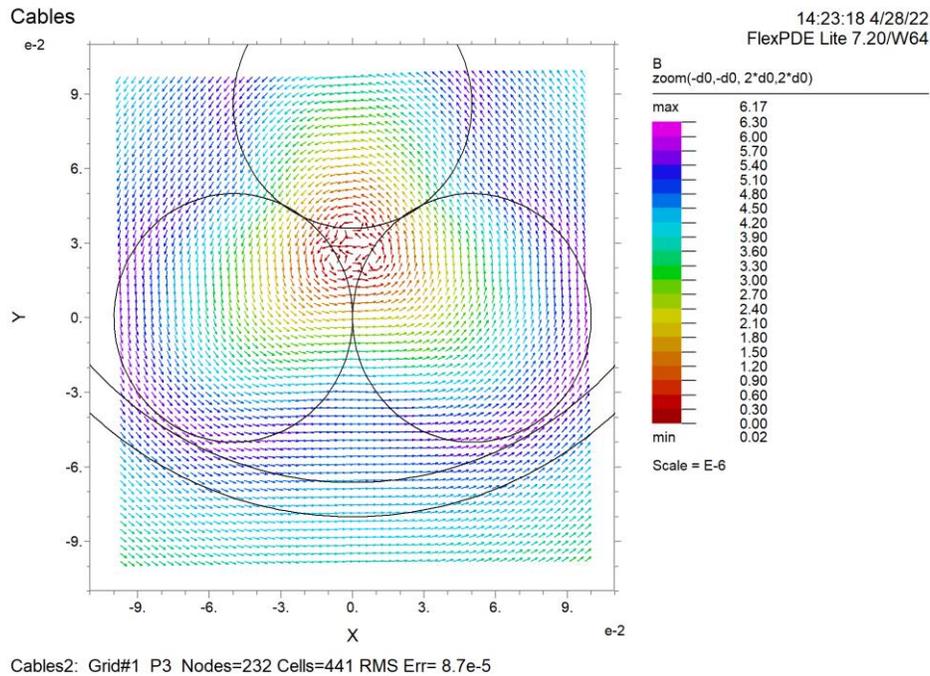
*Simulación del campo magnético para un cable eléctrico subterráneo usando FlexPDE7.*



En la simulación de la figuras 15 y 16, podemos observar que el campo magnético describe una circunferencia alrededor de los conductores que se encuentran dentro de la tubería y a medida que la distancia aumenta la densidad de flujo magnético disminuye, visto más de cerca se evidencia la dirección que toma el campo sugiriendo que la dirección de la corriente es saliendo de la pantalla.

**Figura 16**

*Simulación del campo magnético en cable eléctrico subterráneo usando FlexPDE7.*



### 3.1. Programa de simulación COMSOL Multiphysics

Para la realización de la simulación del cableado subterráneo usaremos como programa principal el software COMSOL Multiphysics propiedad de la empresa COMSOL, originaria de Estocolmo, Suecia fundada por Svante Littmarck y Farhad Saeidi en 1986, este un potente entorno de simulación interactivo que se utiliza para modelar y resolver todo tipo de problemas científicos y de ingeniería (COMSOL, 1988-2022).

La licencia del software N° 2085597 de COMSOL Multiphysics versión 5.4, utilizada para la realización del trabajo fue proporcionada por el Doctor Ramiro Martínez Rey, profesor de tiempo completo de la Universidad Industrial de Santander en la escuela de Ingeniería Química, quien es Ingeniero Químico, Magister en Ingeniería Química y Doctor en Ingeniería Química, él ha utilizado el programa para la simulación de procesos multifísicos de reacciones químicas en

reactores térmicos para proyectos de investigación de pregrado que ha tenido la oportunidad de dirigir en la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander.

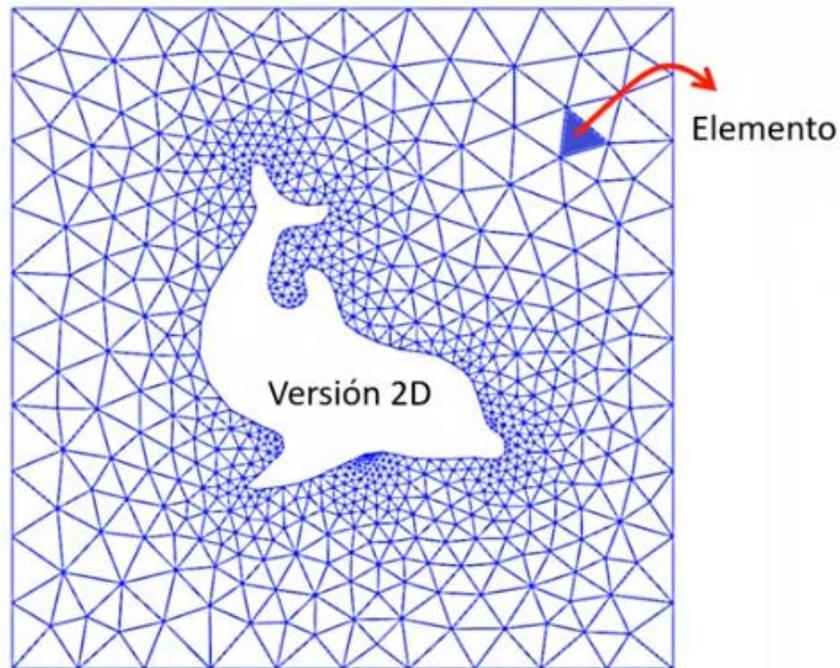
El software permite la realización del modelado de los tres cables eléctricos dentro del medio de enterramiento, configurando cada material dentro de las especificaciones del programa, con el fin que la simulación se realice lo más cercana a la realidad y con esto obtener la medida del campo magnético en el punto requerido el cual será 30 centímetros por encima del nivel del suelo.

El análisis de este sistema se realizara con el complemento del módulo AC/DC del software COMSOL Multiphysics, el cual proporciona una amplia gama de funciones de modelado y métodos numéricos para investigar campos electromagnéticos y EMI/EMC mediante la resolución de las ecuaciones de Maxwell (COMSOL, 1988-2022).

Para la simulación en el software COMSOL Multiphysics se implementa un modelo en dos dimensiones, la solución se desarrolla basada en el método de elementos finitos (FEM) que transforma el modelo diseñado en una malla de muchos elementos, esto con el fin de calcular los valores en cada punto del modelo para obtener buenos resultados (Khouildi et al., 2016). El método FEM se utiliza cuando la geometría es compleja, segmentándola en subdominios simples, garantizando una continuidad entre los valores uniéndolos por nodos, con esto se garantiza que la solución de las ecuaciones diferenciales sea más rápido y no se consuman bastantes recursos computacionales (COMSOL, 1988-2022).

**Figura 17**

*COMSOL Multiphysics método de elementos finitos en dos dimensiones.*



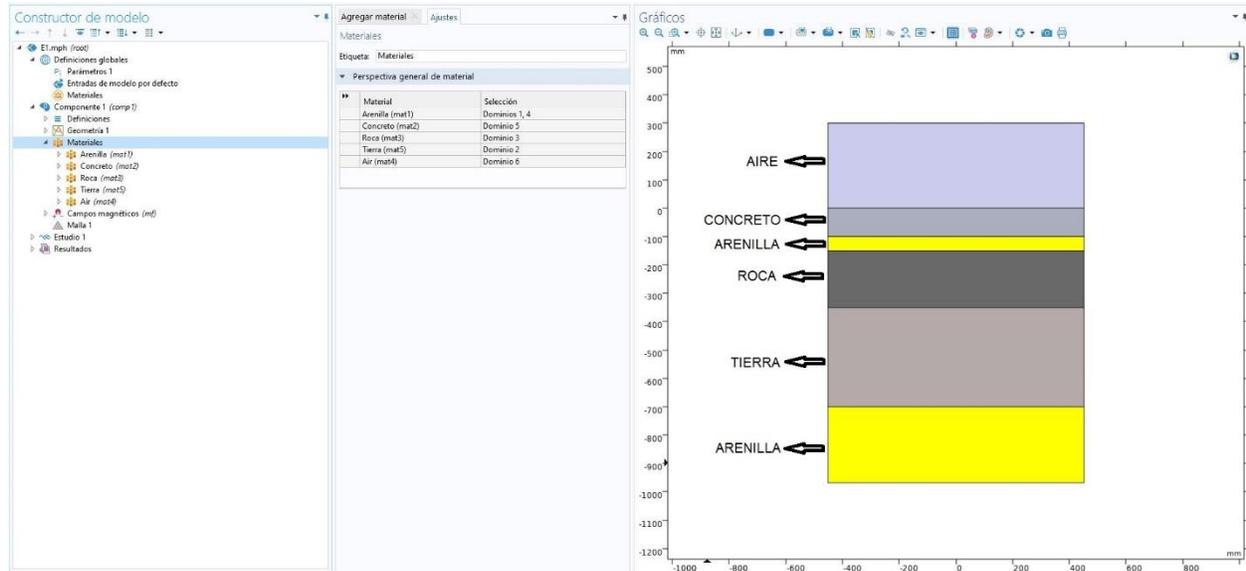
Nota. Imagen tomada de COMSOL. (1988-2022). COMSOL Multiphysics. [www.comsol.com](http://www.comsol.com).

**3.2. Simulación casos de estudio**

Para iniciar con la simulación configuramos las zonas de instalación empezando a revisar los casos de estudio definidos, con ayuda de la norma RS1-006 obtenemos el primer entorno de simulación, en el cual el cableado se encuentra bajo el andén, con los diferentes materiales que distinguen cada zona de enterramiento.

**Figura 18**

*Configuración de zonas de instalación según norma RSI-006 para el caso uno.*



Podemos observar que para realizar el estudio del campo magnético debemos introducir en el software algunas propiedades específicas de cada material, entre estas tenemos las siguientes:

**Tabla 12**

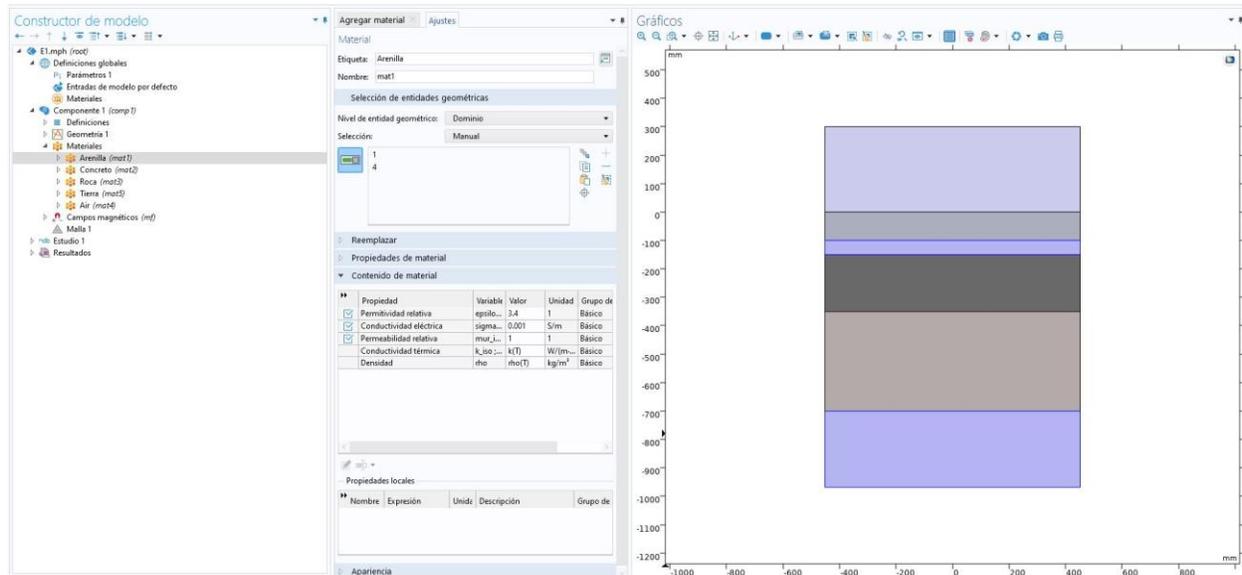
*Propiedades específicas de materiales de relleno usados para la simulación.*

Material	Permitividad relativa ( $\epsilon_r$ )	Conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) (S/m)	Permeabilidad relativa ( $\mu_r$ )
Arenilla	3.4	0.001	1
Concreto	2.25	0.00024	1
Roca	2.2	0.0002	1
Tierra de excavación	2.44	0	1
Aire	1	0	1

Nota. Algunas de estas propiedades son proporcionadas directamente por el software, las demás son obtenidas por medio de investigación en diferentes documentos y artículos.

**Figura 19**

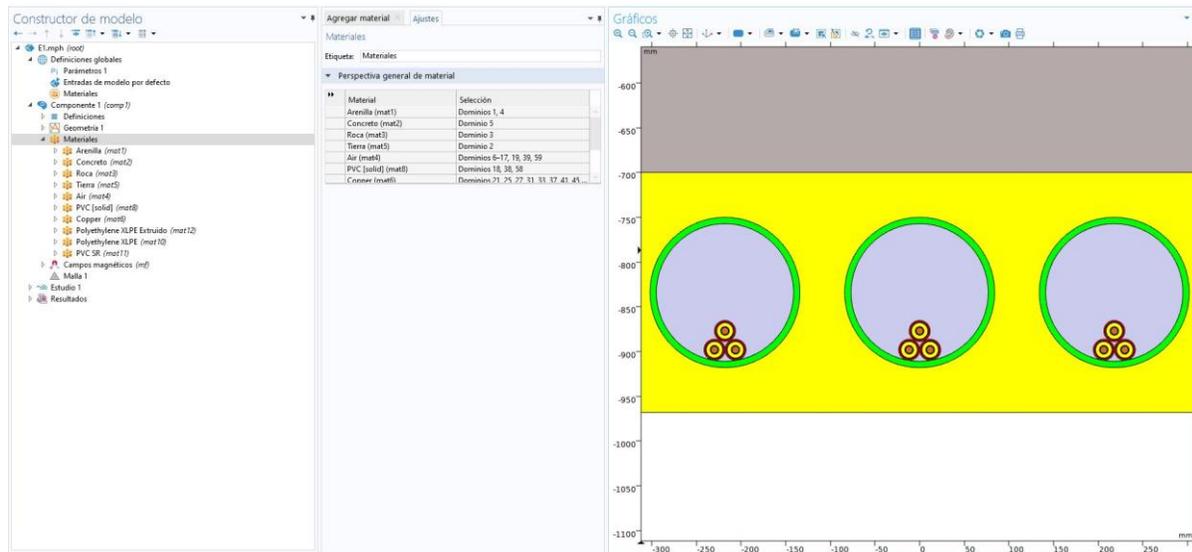
*Configuración de las propiedades de cada material en las zonas de instalación para el caso uno.*



Continuando con la configuración procedemos con el cableado, basados en la ficha técnica del cable 2 AWG, introduciendo los materiales y la corriente máxima que puede transportar la cual será de 155 A, finalmente tenemos el entorno siguiente de simulación.

**Figura 20**

*Configuración del cableado dentro de la tubería, sistema trifásico por cada circuito para el caso uno.*



Para esta parte debemos introducir en el software las propiedades de los materiales que intervienen en el cableado y la tubería, entre estas tenemos los siguientes materiales:

**Tabla 13**

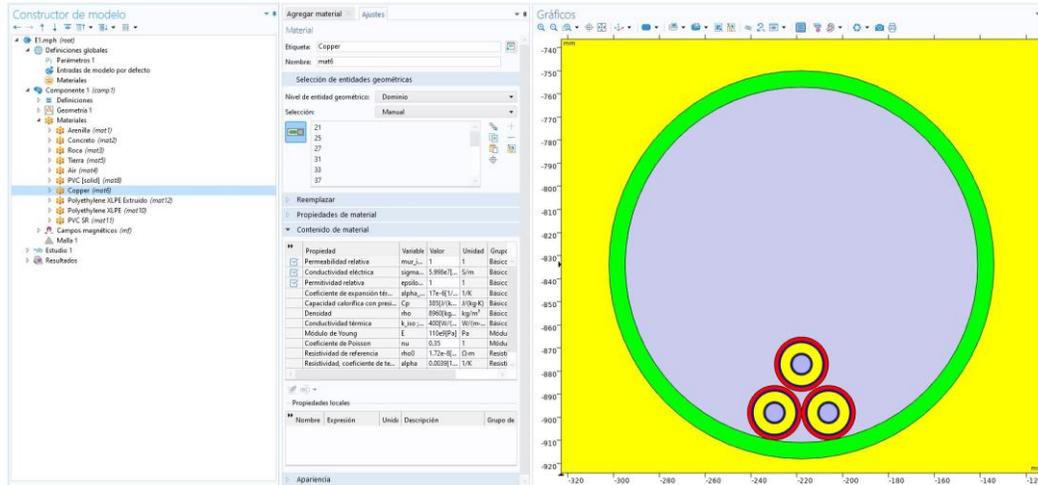
*Propiedades específicas de materiales del cableado y la tubería usados para la simulación.*

Material	Permitividad relativa ( $\epsilon_r$ )	Conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) (S/m)	Permeabilidad relativa ( $\mu_r$ )
Cobre	1	$5.998 \times 10^7$	1
PVC	2.9	$1.0 \times 10^{-16}$	1
XLPE	2.3	$1.0 \times 10^{-15}$	1
Aire	1	0	1
Nylon	3.5	$1.0 \times 10^{-15}$	1

Nota. Algunas de estas propiedades son proporcionadas directamente por el software, las demás son obtenidas de (Mehrddad Frooi, et al. 2017).

**Figura 21**

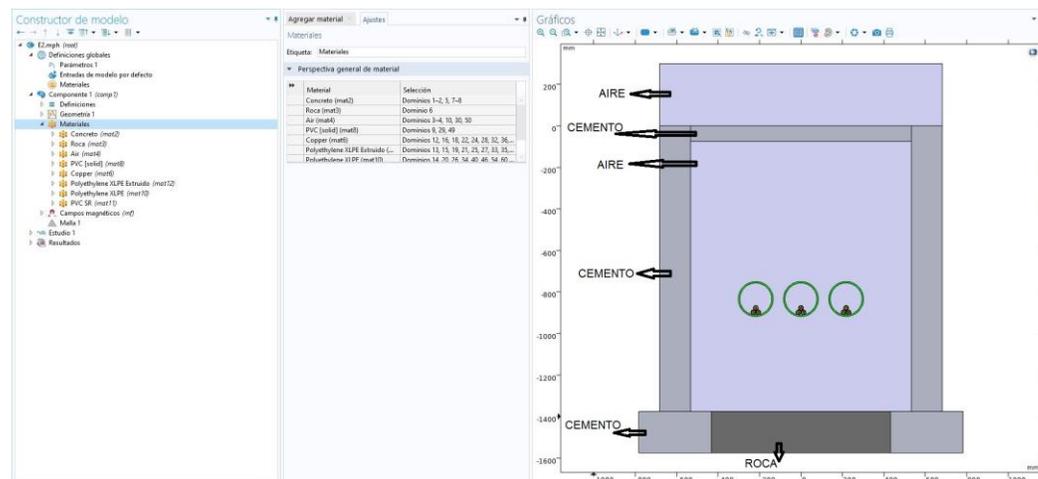
*Configuración de las propiedades de cada material del cableado y la tubería para el caso uno.*



De igual forma realizamos la configuración del segundo caso de estudio con la ayuda de las normas RS3-005 y RS4-001 cuando el cable 2 AWG pasa por la caja de inspección para realizar la derivación que entra al transformador el cual se ubica dentro del edificio. Las propiedades de cada material a utilizar ya fueron expuestas en las tablas 12 y 13, y la corriente máxima se mantiene en 155 A, y el entorno de simulación será el siguiente.

**Figura 22**

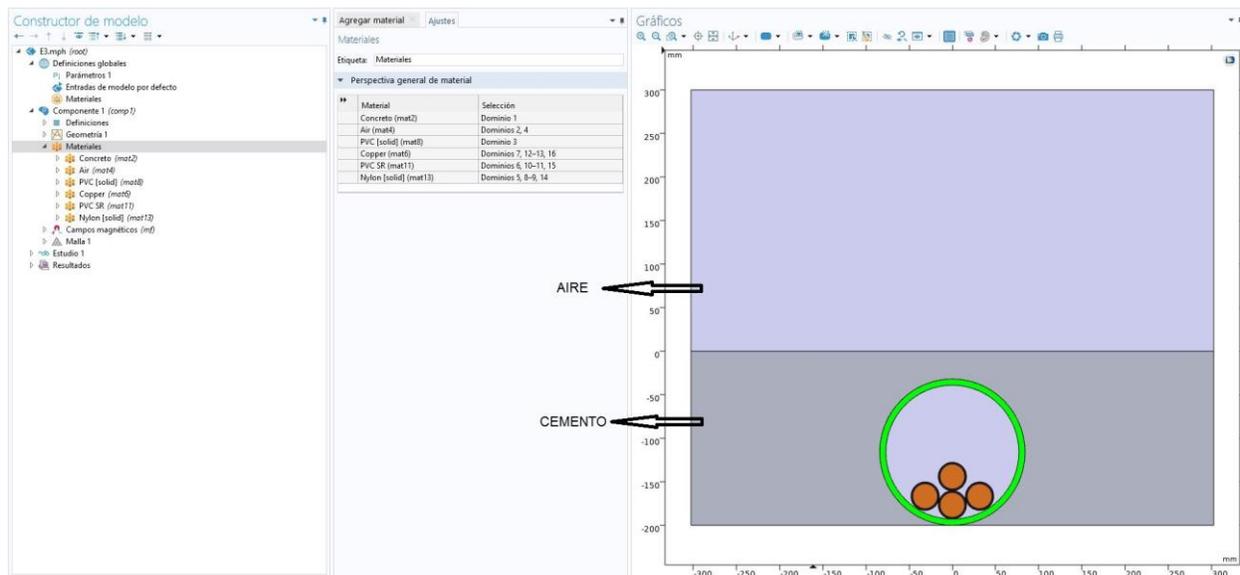
*Configuración de las propiedades de cada material en la zona de instalación para el caso dos.*



Posteriormente procedemos con el tercer caso de estudio con el conductor 1000 kcmil que sale del transformador y va hacia el tablero general de baja tensión, transportando una corriente máxima de 1055 A por una tubería que pasa por debajo del suelo de hormigón del piso del sótano, con base en los datos proporcionados por el constructor atendiendo el reglamento NSR-10 y los datos de la tablas 12 y 13 configuramos el siguiente entorno de simulación.

### Figura 23

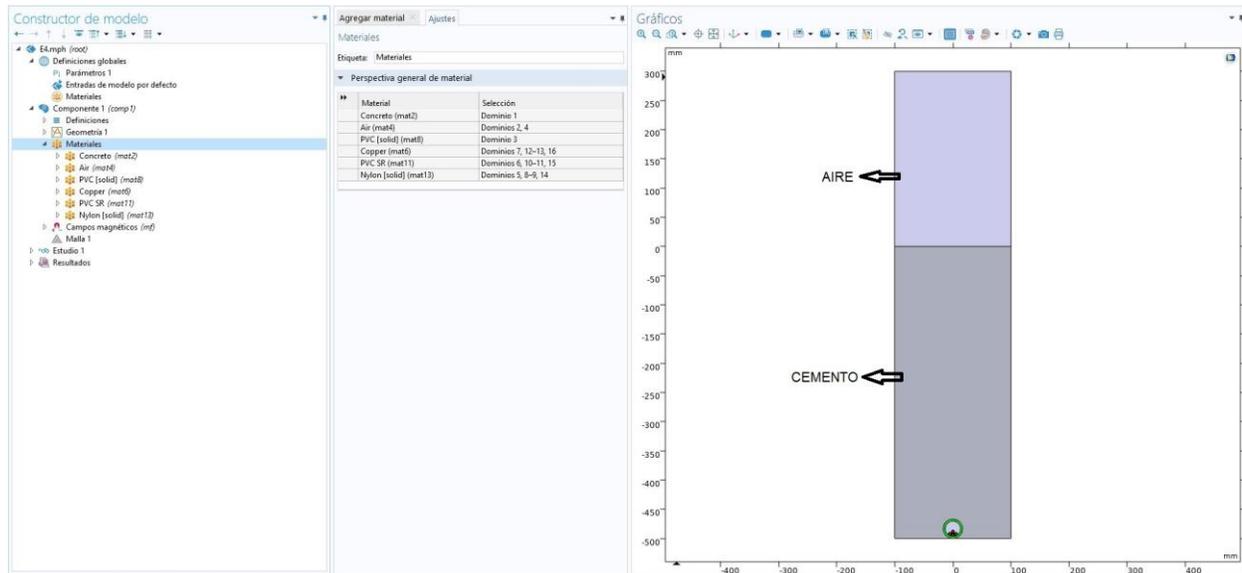
*Configuración de las propiedades de cada material en la zona de instalación para el caso tres.*



Finalmente para el cuarto caso de estudio, el conductor a utilizar será el 8 AWG que sale del tablero general de baja tensión y se deriva para las acometidas de cada uno de los apartamentos que conforman la edificación, transportando una corriente máxima de 55 A, pasando por una tubería que pasa por el suelo de hormigón de cada piso, de igual forma nos basaremos en los datos proporcionados por el constructor atendiendo el reglamento NSR-10 y los datos de la tablas 12 y 13 para la configuración del siguiente entorno de simulación.

**Figura 24**

*Configuración de las propiedades de cada material en la zona de instalación para el caso cuatro.*



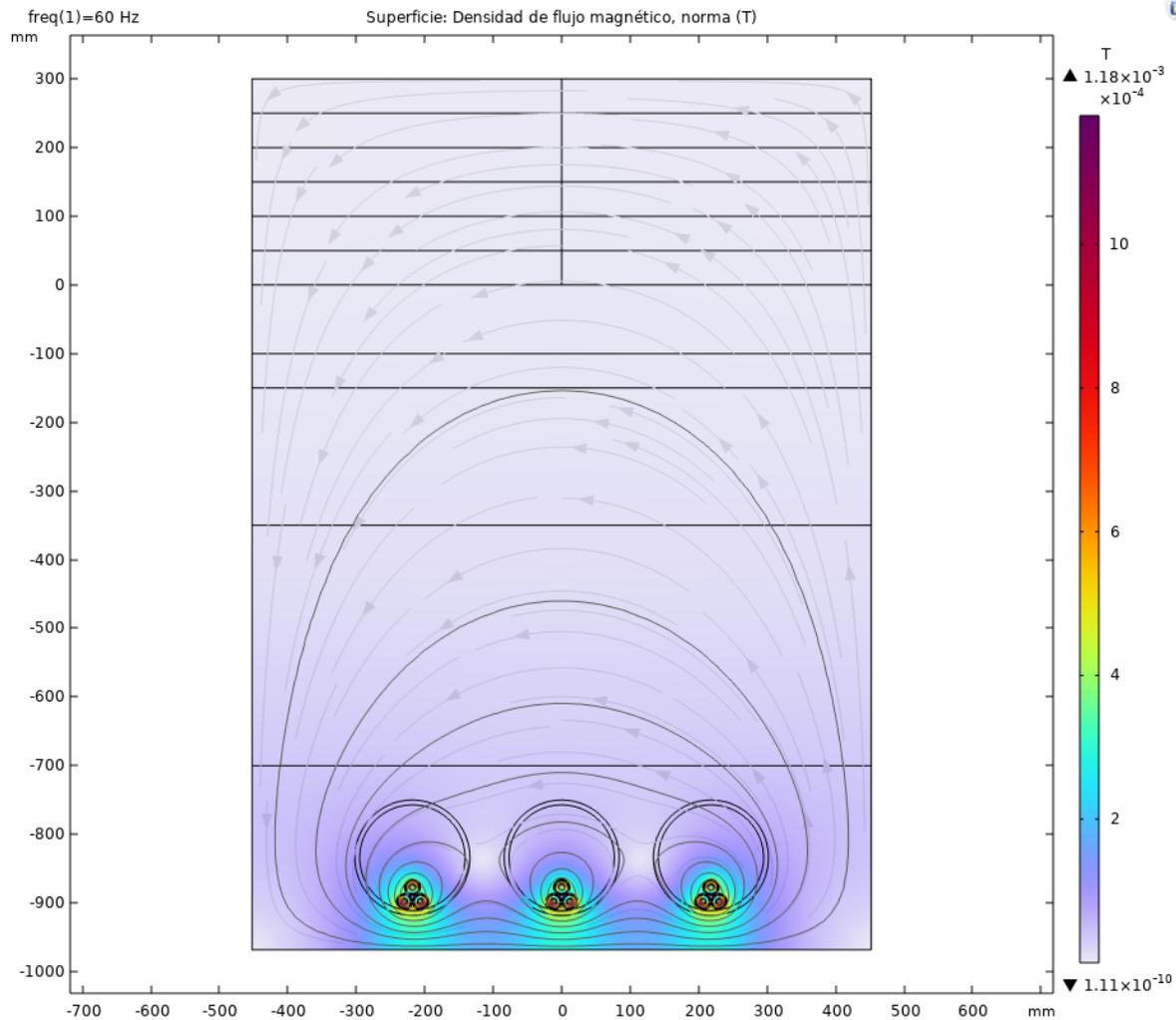
### 3.3. Resultados simulación de casos de estudio

Continuando con el proceso de simulación una vez configurado el entorno del software obtenemos los siguientes resultados para el campo magnético en cada caso de estudio medidos a 30 centímetros sobre el nivel del suelo.

Para el primer caso de estudio con el conductor 2 AWG que pasa por el andén, con una corriente máxima de 155 A y una frecuencia de 60 Hz, los resultados son los siguientes.

**Figura 25**

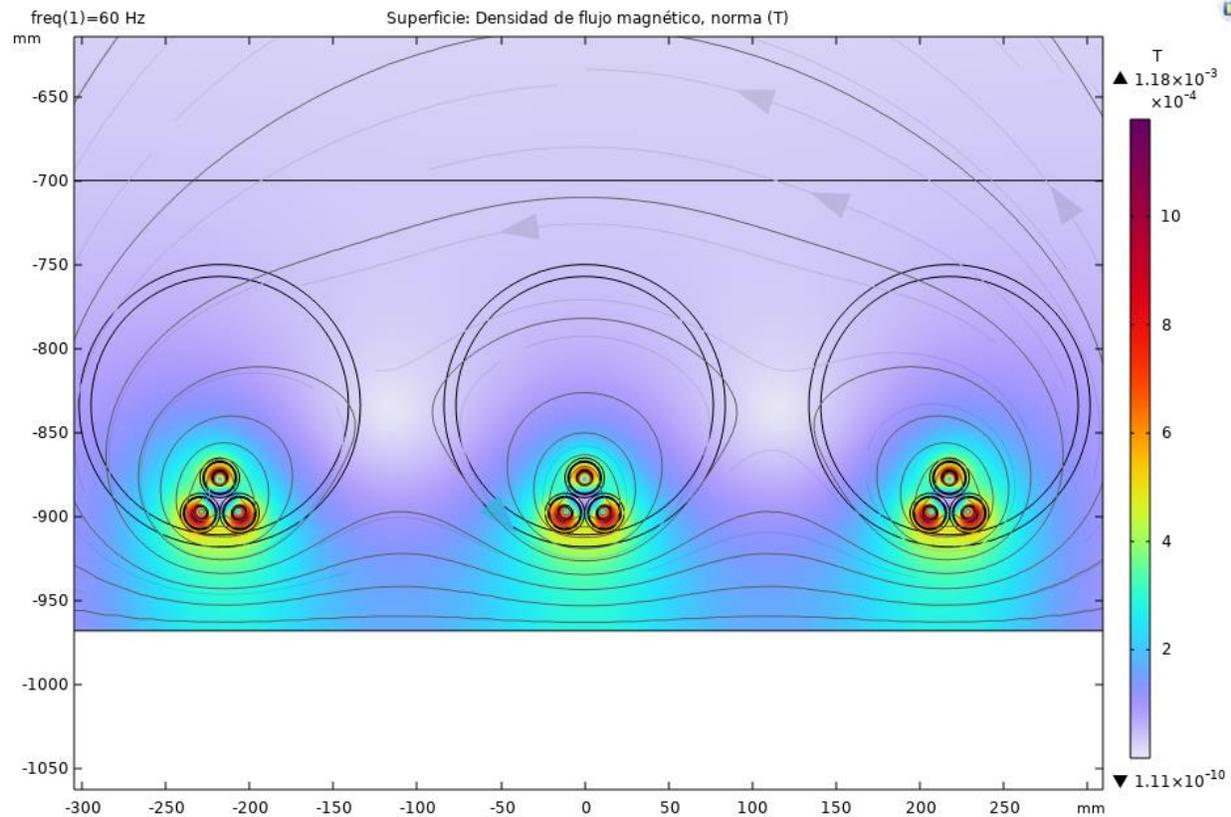
*Líneas de flujo magnético obtenidas en la simulación con el software COMSOL para el caso uno.*



La figura nos muestra como es la distribución de la densidad de flujo magnético a medida que se cambia de material, observando que la mayor cantidad de flujo se concentra donde se encuentran los conductores y disminuye a medida que se acerca a la superficie y aumenta la distancia de separación.

**Figura 26**

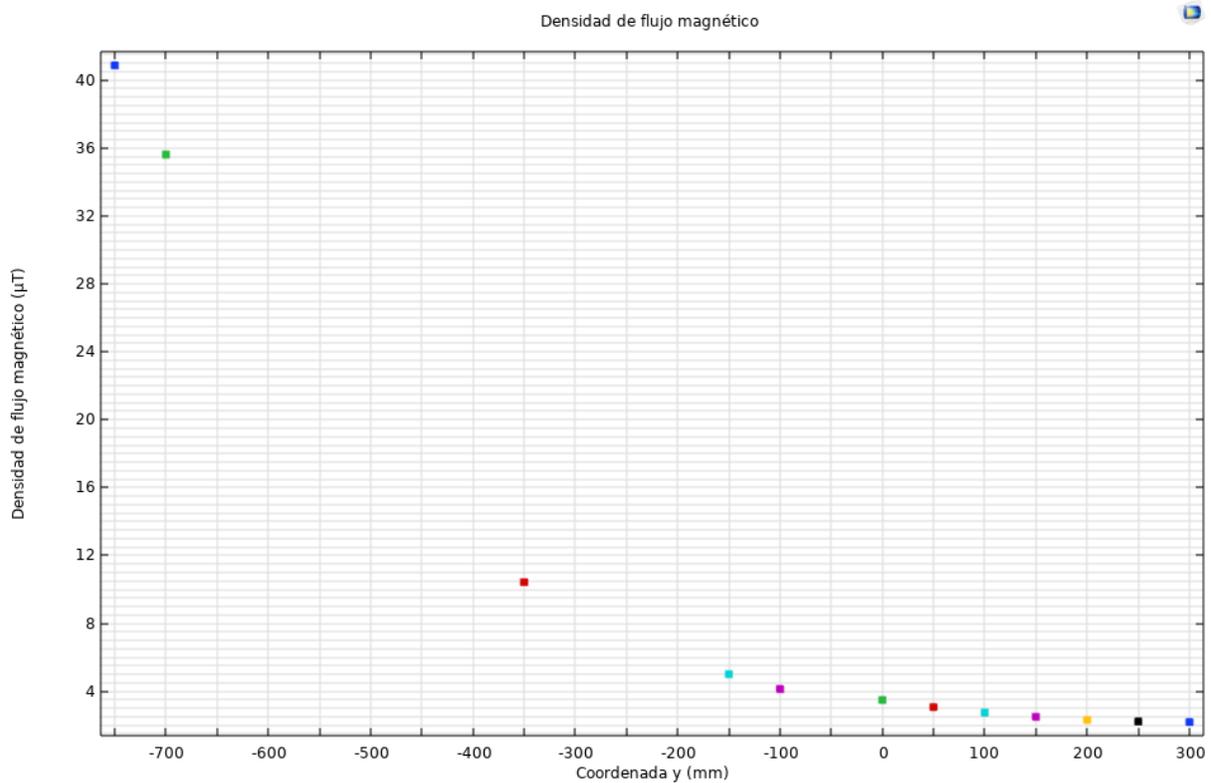
*Concentración del flujo magnético en los conductores, simulación con el software COMSOL para el caso uno.*



En la gráfica podemos observar la cantidad de flujo magnético en función de la distancia de separación desde la tubería hasta los 30 centímetros de medida sobre la superficie, estos datos se evidencian en la tabla 14, debido a la delimitación del espacio de simulación se evidencio una anomalía en las líneas de flujo, que no altero en gran medida las medidas que podemos observar más adelante, este fenómeno se puede corregir ampliando el área de simulación.

**Figura 27**

Gráfica de la magnitud del flujo magnético en diferentes puntos para el caso uno.

**Tabla 14**

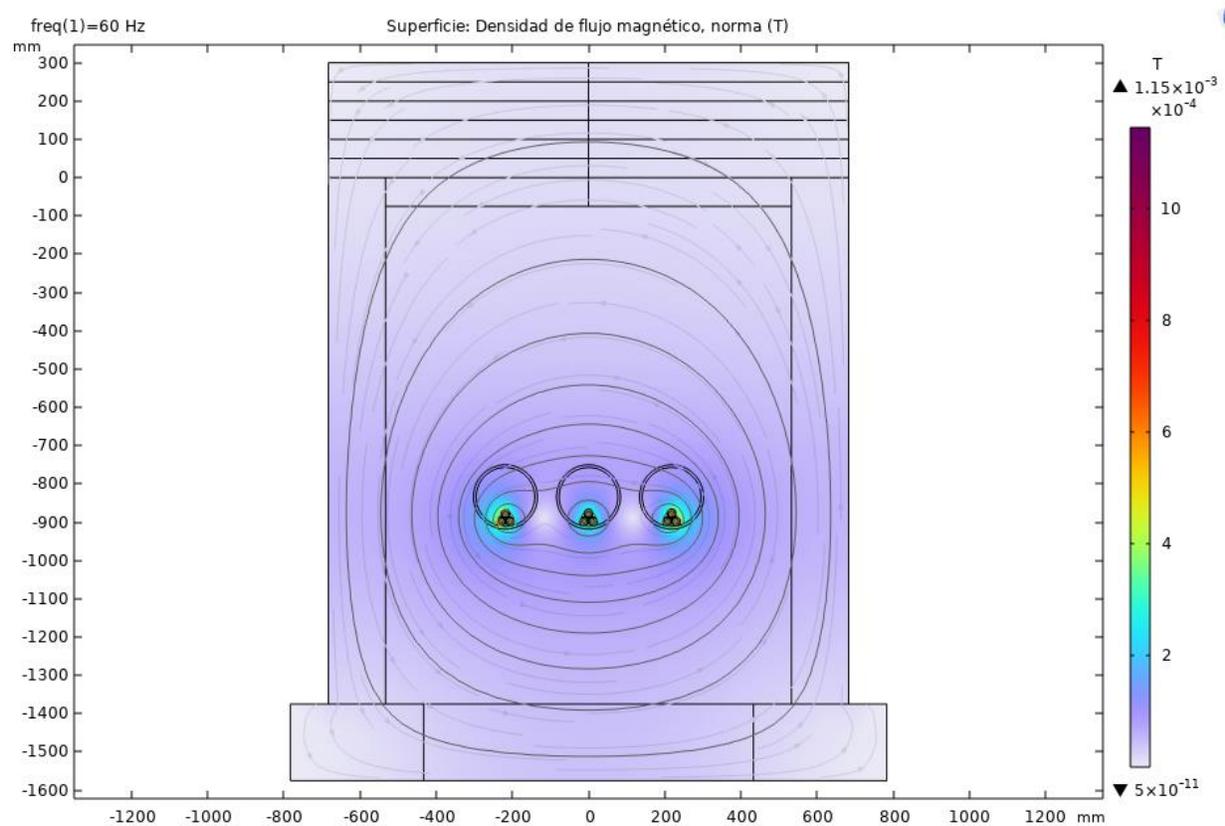
Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 27.

Coordenada Y (mm)	Densidad de flujo magnético (μT)
-750.00	40.874
-700.00	35.618
-350.00	10.428
-150.00	5.0141
-100.00	4.1330
0.0000	3.4933
50.000	3.0715
100.00	2.7423
150.00	2.4960
200.00	2.3253
250.00	2.2248
300.00	2.1933

Para el segundo caso de estudio con el conductor 2 AWG que pasa por la caja de inspección los resultados obtenidos de la densidad de flujo magnético fueron los siguientes.

### Figura 28

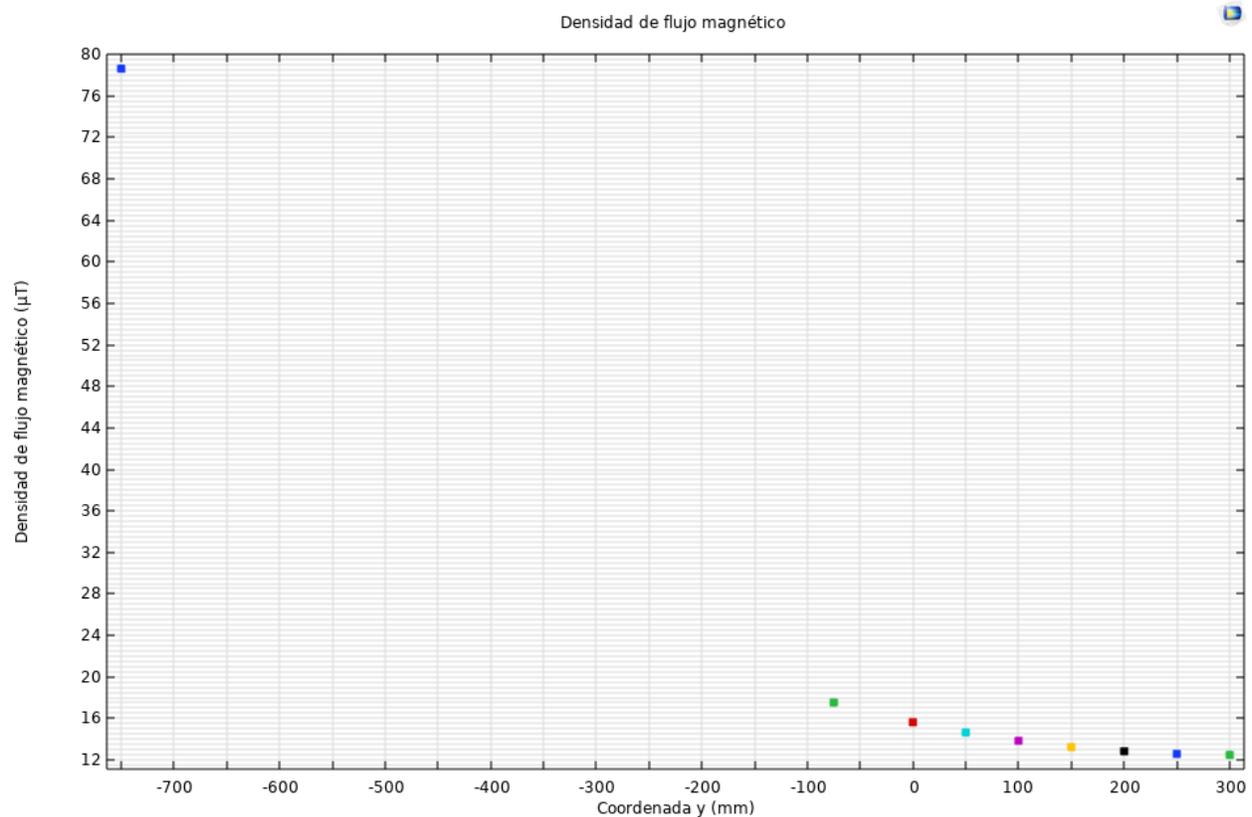
*Líneas de flujo magnético obtenidas en la simulación con el software COMSOL para el caso dos.*



La figura nos muestra como es la distribución de la densidad de flujo magnético al pasar por esta zona, esta al ser una caja solo interactúa con el aire y la tapa de cemento, en la figura podemos observar cómo va disminuyendo la densidad de flujo a medida que se acerca a la superficie y a los 30 centímetros de medida, detallados en la tabla 15.

**Figura 29**

*Gráfica de la magnitud del flujo magnético en diferentes puntos para el caso dos.*

**Tabla 15**

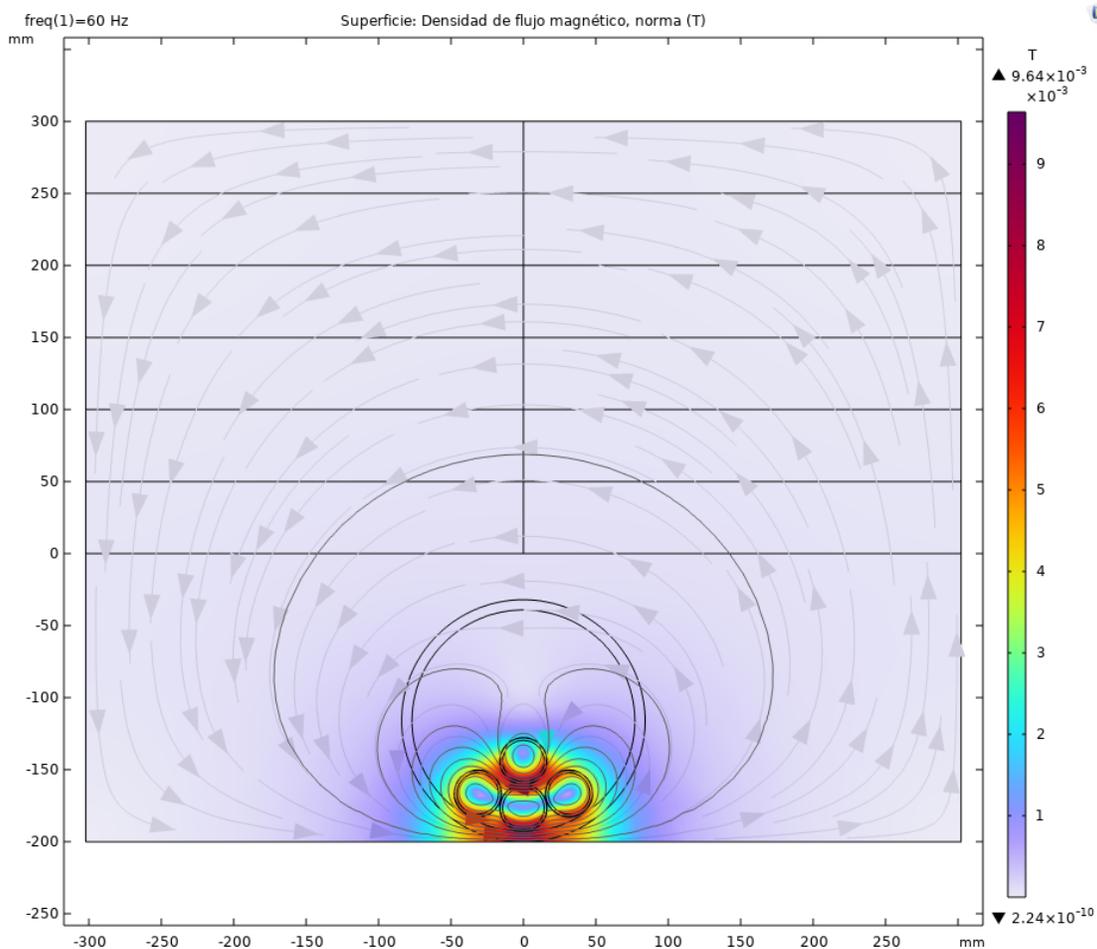
*Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 29.*

Coordenada Y (mm)	Densidad de flujo magnético (μT)
-750.00	78.647
-75.00	17.539
0.0000	15.642
50.000	14.645
100.00	13.853
150.00	13.249
200.00	12.824
250.00	12.571
300.00	12.491

Para el tercer caso de estudio con el conductor 1000 kcmil que va del transformador al tablero general de baja tensión por el suelo de hormigón transportando una corriente máxima de 1055 A los resultados obtenidos para la densidad de flujo magnético fueron los siguientes.

### Figura 30

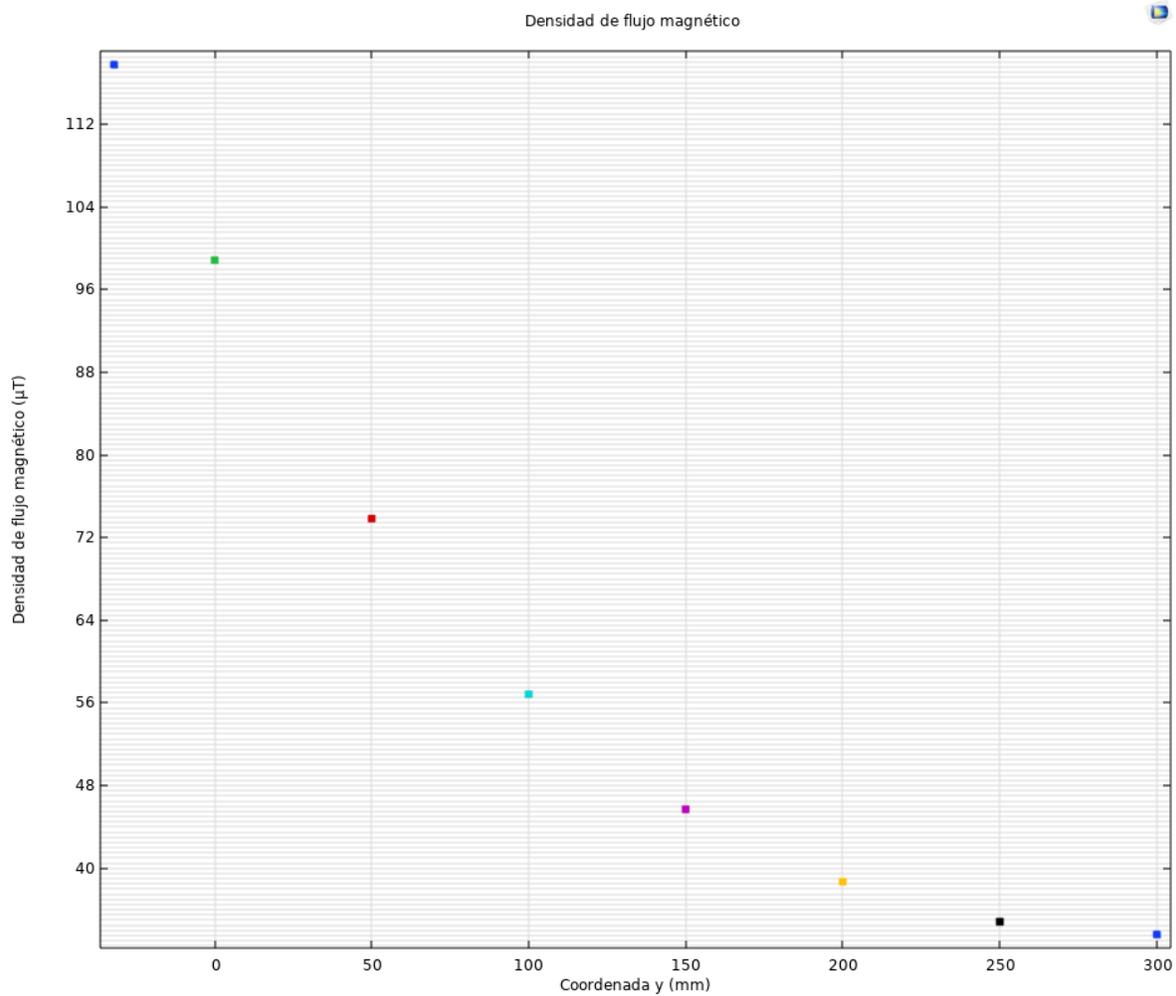
*Líneas de flujo magnético obtenidas en la simulación con el software COMSOL para el caso tres.*



La figura evidencia el comportamiento de la densidad de flujo magnético en el suelo de hormigón y después en el aire al salir a la superficie a los 30 centímetros de medida, en la tabla 16 se detalla la magnitud del campo magnético en cada medida.

**Figura 31**

*Gráfica de la magnitud del flujo magnético en diferentes puntos para el caso tres.*

**Tabla 16**

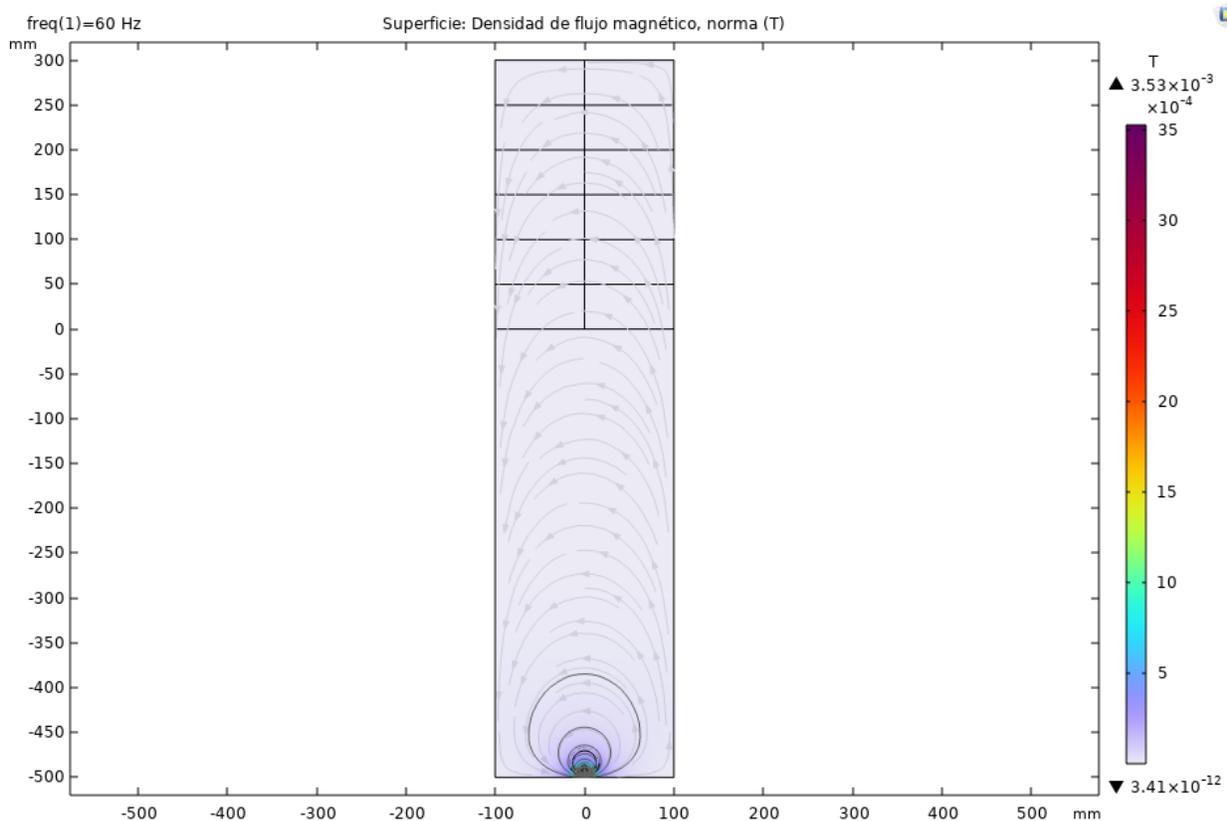
*Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 31.*

Coordenada Y (mm)	Densidad de flujo magnético (μT)
-32.00	117.75
0.0000	98.831
50.0000	73.830
100.00	56.851
150.00	45.724
200.00	38.717
250.00	34.838
300.00	33.617

Para el cuarto caso de estudio con el conductor 8 AWG que va del tablero general de baja tensión a cada apartamento del edificio pasando por debajo del suelo de hormigón transportando una corriente máxima de 55 A, los resultados son los siguientes.

### Figura 32

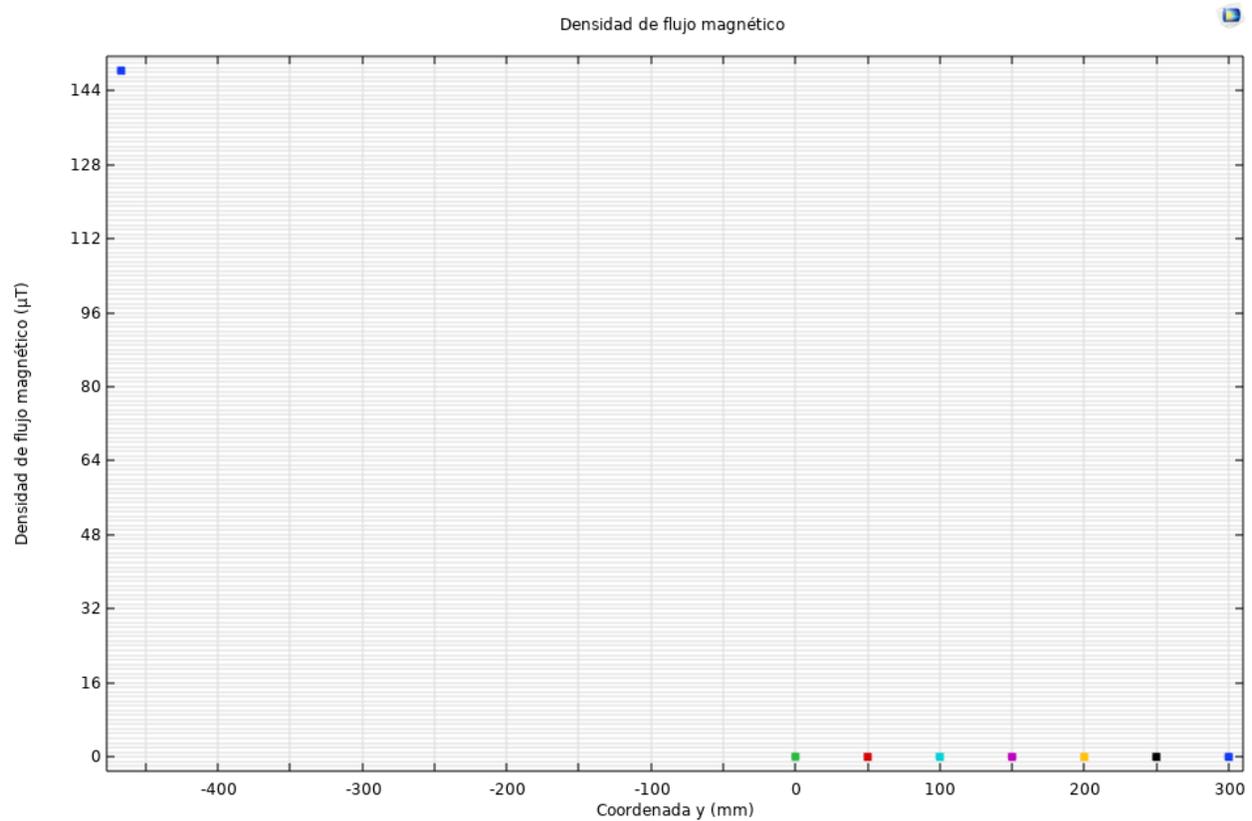
*Líneas de flujo magnético obtenidas en la simulación con el software COMSOL para el caso cuatro.*



La figura muestra el comportamiento de la densidad de flujo magnético en el suelo de hormigón que pasa por los diferentes pisos, además del comportamiento a los 30 centímetros de medida, en la tabla 17 se detalla la magnitud del campo magnético en cada medida que se gráfica en la figura 30.

**Figura 33**

*Gráfica de la magnitud del flujo magnético en diferentes puntos para el caso cuatro.*

**Tabla 17**

*Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 33.*

Coordenada Y (mm)	Densidad de flujo magnético (μT)
-467.00	148.36
0.0000	0.029987
50.0000	0.013683
100.0000	0.0062458
150.0000	0.0028679
200.0000	0.0013518
250.0000	0.00071357
300.0000	0.00054809

#### 4. Diseño del escudo

Para el primer caso de estudio los resultados obtenidos nos muestran que a una medida de 30 centímetros del nivel del suelo la densidad del flujo magnético es de  $2.2248 \mu\text{T}$ , este nivel es 200 veces menor que el exigido por el RETIE en su artículo 14, cumpliendo así con la normatividad nacional, sin embargo debido a que la instalación cruza por el andén de entrada a la edificación, se buscara una reducción del nivel de campo magnético en este punto, atendiendo la sugerencia del Organismo Suizo de Medio Ambiente (Burgos y Lobelo, 2004), intentando que este valor sea de  $1 \mu\text{T}$  a este nivel de 30 centímetros.

Para el segundo caso de estudio los resultados obtenidos nos muestran un aumento en la densidad de flujo magnético con respecto al caso uno, debido a que en la caja el cableado está expuesto al aire y solo se separa de la superficie por la tapa de cemento, los datos muestran que la densidad de flujo a 30 centímetros es de  $12.491 \mu\text{T}$ , este valor cumple con los límites establecidos en el artículo 14 del RETIE, pero debido al gran aumento que se obtuvo con respecto al caso 1 también se buscara una reducción de este a un nivel de  $1 \mu\text{T}$  a la medida de 30 centímetros, atendiendo la sugerencia del Organismo Suizo de Medio Ambiente (Burgos y Lobelo, 2004) y la ley Italiana que expone un límite de  $10 \mu\text{T}$  como valor de atención de efectos a largo plazo (Il Presidente del Consiglio dei Ministri, 2003).

Para el tercer caso de estudio la densidad de flujo magnético obtenido a los 30 centímetros de medida es de  $33.617 \mu\text{T}$ , cumpliendo con los límites normativos del artículo 14 del RETIE, sin embargo dicha instalación se encuentra ubicada dentro de un área en la que habrá circulación permanente de personas y posibles trabajadores, de igual forma se puede prever la instalación de equipos electrónicos, por tal motivo se considera necesario una reducción del campo magnético

en este punto a  $1 \mu\text{T}$ , atendiendo la sugerencia del Organismo Suizo de Medio Ambiente (Burgos y Lobelo, 2004).

Para el cuarto caso de estudio los resultados obtenidos muestran un comportamiento del flujo magnético muy inferior a los límites establecidos en el artículo 14 del RETIE, con una magnitud del campo magnético de  $0.00054809 \mu\text{T}$  a los 30 centímetros del nivel del suelo, por tal motivo para este caso de estudio no se realizará el diseño del escudo para la mitigación del campo magnético, ya que su nivel es muy inferior a  $1 \mu\text{T}$  y la instalación de este blindaje tendrá un alto costo por la cantidad de acometidas por cada piso.

#### 4.1. Teoría de blindajes

Un blindaje es un elemento dispuesto entre dos regiones que se utiliza para atenuar la propagación de una onda electromagnética, dependiendo del material y la frecuencia en la que se utilizara este tendrá una efectividad. La efectividad de un blindaje para campos magnéticos se define en términos de atenuación de la intensidad del campo, esta se expresa como  $S$  y sus unidades son dB.

$$S = 20 \log \frac{H_0}{H_1} \quad (1)$$

En la ecuación,  $H_0$  es la intensidad de campo magnético sin blindaje y  $H_1$  la intensidad de campo con el blindaje (Balcells et al., 1992. p. 87), esta efectividad varia con la frecuencia, la posición de medida del campo, el tipo de campo, la polarización y la dirección de la incidencia.

Cuando una onda de campo magnético pasa por una superficie metálica, se producen dos efectos diferentes, la onda es parcialmente reflejada por dicho material y la parte transmitida es atenuada al pasar por esta superficie, provocando pérdidas por absorción (A) y perdidas por

reflexión (R), la efectividad del blindaje también se define como la suma de estas dos pérdidas más un factor B definido por las múltiples reflexiones que provoca el material (Balcells et al., 1992. p. 87).

$$S = A + R + B \quad (2)$$

La tabla 18 muestra una comparación de la eficiencia de algunos materiales utilizados para la atenuación de campo magnético en el rango de frecuencia que se estudia en este documento que será de 60 Hz.

**Tabla 18**

*Efectividad de blindajes según el tipo de material.*

Material	Rango de frecuencia en kHz	Perdidas de absorción	Perdidas de reflexión
Magnético			
$\mu_r = 1000$ $\sigma_r = 0.1$	<1	A - B	A
No magnético			
$\mu_r = 1$ $\sigma_r = 1$	<1	A	B
Atenuación en dB			
A		0 – 10 dB	(muy inefectivo)
B		10 – 30 dB	(inefectivo)

Nota. Información tomada de Burgos Sequeda O. A., Lobelo Diaz A. (2004). *Estudio de los campos magnéticos producidos por subestaciones de distribución a 13.2 kV y los problemas que ocasionan en equipos electrónicos y personas*. Universidad Tecnológica De Bolívar - Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica Y Mecatrónica. Cartagena de Indias.

Las pérdidas por absorción son el principal mecanismo de apantallamiento de campos magnéticos de baja frecuencia, ya que la onda al pasar a través del blindaje disminuye su amplitud debido a las corrientes inducidas, estas provocan disipación de calor en el material. Para que la onda sea atenuada 36.7 % de su valor inicial requiere de una distancia denominada profundidad de penetración ( $\delta$ ), esta característica es propia de cada material (Burgos y Lobelo, 2004), con la ecuación (3) se puede obtener este valor, donde  $\mu_r$  es la permeabilidad relativa del material,  $\sigma$  es la conductividad relativa del material y  $f$  es la frecuencia en MHz, este valor se da en centímetros (Balcells et al., 1992. p. 87).

$$\delta = \frac{0.0066}{\sqrt{\mu_r \sigma_r f}} \quad (3)$$

La ecuación que define las pérdidas por absorción ( $A$ ) es la siguiente, donde  $t$  es el espesor en centímetros,  $f$  es la frecuencia en MHz,  $\mu_r$  es la permeabilidad relativa del material y  $\sigma$  es la conductividad relativa del material (Balcells et al., 1992. p. 88).

$$A = 1314.3 t \sqrt{\mu_r \sigma_r f} \quad (4)$$

Para el cálculo del factor  $B$  debido a las múltiples reflexiones se utiliza la siguiente ecuación (Balcells et al., 1992. p. 91).

$$B = 20 \log \left( 1 - e^{-\frac{2t}{\delta}} \right) \quad (5)$$

Las pérdidas por reflexión se presenta en la frontera entre dos medios y se relaciona con las impedancias características de cada uno ( $Z$ ), si el blindaje es delgado en comparación con la profundidad de penetración se presentaran pocas pérdidas por absorción, provocando múltiples

reflexiones (Balcells et al., 1992. p. 91). La impedancia de cada material se define con la ecuación (6).

$$|Z| = 3.68 * 10^{-7} \sqrt{f} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} \quad (6)$$

Para el campo magnético las pérdidas por reflexión aumentan al disminuir la frecuencia y aumentar la conductividad del material, por tal motivo es difícil apantallar en bajas frecuencias por la baja efectividad del blindaje. Con la ecuación (7) se puede obtener el valor de estas pérdidas, donde  $d$  es la distancia en centímetros que hay del emisor al blindaje (Balcells et al., 1992. p. 90).

$$R = 74.6 - 10 \log \left( \frac{\mu_r}{f d^2 \sigma_r} \right) \quad (7)$$

## 4.2. Diseño y selección del escudo

### 4.2.1. Técnicas de apantallamiento

Existen dos grupos principales en los que se agrupan las técnicas para la mitigación del campo magnético que son:

**Métodos intrínsecos:** Estos consisten en cambiar parámetros eléctricos y geométricos de la línea subterránea y que pueden influir en la generación del campo magnético, esto se logra actuando sobre la disposición de los conductores o aumentando el nivel de enterramiento, obteniendo una reducción significativa en el nivel del campo magnético generado (Ippolito et al., 2015).

**Métodos externos:** Estos requieren de equipos externos para mitigar el campo magnético en el entorno cerca de la fuente, aquí se encuentran los escudos activos y pasivos. Los escudos activos consisten en conductores eléctricos por los cuales se hace circular una corriente controlada,

generando un campo magnético que ayuda a mitigar el campo magnético externo, estos requieren de un sistema de control, que module la corriente en el escudo para seguir la variación del campo magnético externo (Ippolito et al., 2015). Los escudos pasivos los cuales son pantallas en materiales ferromagnéticos que se entierran cerca o por encima de la línea eléctrica y su función es interceptar el campo magnético y lo reduce cerca de esta región, el principio de funcionamiento de las se basa en la ley de Faraday-Neumann-Lenz, el campo magnético externo genera corrientes de Foucault en la pantalla las cuales a su vez tienden a generar un campo magnético opuesto al externo (Serway, 1997).

Con base en lo anterior la técnica usada en este proyecto será un método externo, por medio de un escudo pasivo, usando una lámina de material ferromagnético que se instalará encima de la línea eléctrica y atenuara el flujo magnético que saldrá a la superficie.

#### ***4.2.2. Material para el diseño del blindaje***

Para el blindaje se utilizará un material con alta permeabilidad y baja conductividad, los cuales son llamados ferromagnéticos, lo que garantiza unas altas pérdidas por absorción y unas bajas pérdidas por reflexión. Algunos ejemplos de estos materiales son: el hierro, el cobalto, el níquel, el gadolino y el disprosio. Dichos materiales contienen momentos magnéticos atómicos que tienden a alinearse paralelos entre sí incluso en un campo magnético externo débil (Serway, 1997). Dependiendo de la intensidad de campo magnético aplicada y la historia de la sustancia tendrá asociada una histéresis magnética, esta se representa como una curva magnetización que representa el trabajo requerido para llevar el material por el ciclo de magnetización, este proceso al repetirse varias veces con lleva a que en el material se transforme de energía magnética en energía térmica interna, la cual eleva la temperatura de la sustancia (Serway, 1997). Para campos

magnéticos de baja frecuencia se requiere una gran cantidad de material ferromagnético en el blindaje.

Para la selección del tipo de material que usaremos en el blindaje tomaremos materiales metálicos de más fácil adquisición, estos son: el hierro y el acero. Estos materiales poseen una alta permeabilidad, garantizando unas altas pérdidas por absorción. Para empezar analizaremos la tabla 19 con la conductividad y la permeabilidad de cada uno de estos, valores que serán de gran ayuda para hallar el espesor de dicho material, una vez obtenido este valor se compara su espesor comercial y su precio en el mercado, con esto tomaremos el más económico y el que mejor atenué el campo magnético.

**Tabla 19**

*Propiedades de los materiales para el blindaje.*

Material	Conductividad relativa ( $\sigma_r$ )	Permeabilidad relativa ( $\mu_r$ )
Hierro	0.17	5000
Acero	0.02	500

Nota. Información tomada de Balcells J., Daura F., Esparza R., Pallas R. (1992). *Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Eléctricos*. Alfaomega Marcombo. Página 88.

#### ***4.2.3. Propuesta de diseño de escudo en cada caso de estudio***

Basado en lo expuesto tanto en la sección 4.2.1 y 4.2.2 se inician con la propuesta de diseño del blindaje que se implementara en cada caso de estudio.

Para el caso de estudio del nivel de tensión de 13.2 kV del cableado que pasa por el andén, se estima reducir la intensidad de campo magnético a 1  $\mu$ T, lo que quiere decir una efectividad del blindaje de 6.82 dB según ecuación (1).

$$S = 20 \log \frac{2.1933}{1} = 6.822 \text{ dB}$$

Continuando con el diseño del escudo necesitamos una ubicación para la instalación que permita unas pérdidas por reflexión bajas en comparación con las pérdidas por absorción, para este primer caso de estudio la lámina se ubicara a 250 mm por encima de la tubería, justo por debajo de la banda plástica, la cual indica que la instalación pasa por este sitio, permitiendo que en caso de futuras reparaciones no se ocasionen daños a la lámina o pueda ser reemplazada con facilidad. Con este dato y los de la tabla 19 usamos la ecuación (7) para obtener las pérdidas por reflexión de cada material.

$$R = 74.6 - 10 \log \left( \frac{\mu_r}{f d^2 \sigma_r} \right)$$

Para obtener finalmente el grosor de la lámina de cada material se empleara la ecuación (2) reemplazando el valor obtenido anteriormente de las pérdidas por reflexión y reemplazando las ecuaciones (4) y (5) en dicha ecuación, la frecuencia será de 60 Hz y los datos de cada material se encuentran en la tabla 19, usando el software MATLAB cuya licencia es proporcionada por la Universidad Industrial de Santander para todos sus estudiantes, profesores y personal administrativo, hallamos el valor de t de cada uno, obteniendo finalmente.

$$6.822 = 1314.3 t \sqrt{\mu_r \sigma_r f} + R + 20 \log \left( 1 - e^{-\frac{2t}{\delta}} \right) \quad (8)$$

El espesor obtenido para cada lámina de los diferentes materiales se detalla en la tabla 20.

**Tabla 20**

*Especificaciones y resultados obtenidos en el software MATLAB de cada material para el caso uno.*

Material	Espesor (mm)	Espesor comercial	Perdidas por absorción (dB)	Perdidas por reflexión (dB)	Precio (US\$)	Dimensiones en metros
Hierro	0.052	Calibre 29 (0.35 mm)	1.5607	15.6551	5	2 x 1
Acero	0.447	Calibre 26 (0.45 mm)	1.44	16.3609	11	1.2 x 2.4

Nota. Información de precio y dimensiones (Maploca, 2022).

Con estos valores de la tabla 20 podemos observar que la de menor espesor fue el hierro y la de mayor espesor fue el acero, analizando los distribuidores de este material podemos definir el calibre de la lámina a usar en cada caso, para la lámina de hierro se usaría un calibre 29 de 0.35 mm de espesor y para la lámina de acero un calibre 26 con 0.45 mm de espesor (Maploca, 2022). El precio de cada una de estas nos permiten concluir que la mejor opción es el hierro, por su bajo costo y sus bajas medidas que nos permitirán un ahorro de material al momento de la instalación. Finalmente se procede a modificar la simulación añadiendo esta lámina y observar sus resultados.

Para el segundo caso de estudio en el nivel de tensión de 13.2 kV del cableado que pasa por la caja de inspección, se estima reducir la intensidad de campo magnético a 1  $\mu$ T, lo que quiere decir una efectividad del blindaje de 21.93 dB según ecuación (1).

$$S = 20 \log \frac{12.491}{1} = 21.93 \text{ dB}$$

Para la ubicación de la lámina solo se puede instalar en la parte de debajo de la tapa de la caja lo que sugiere una distancia de 675 mm de la tubería. Realizando el mismo procedimiento

utilizado en el primer caso usando las ecuaciones (7) y (8) obtenemos la siguiente tabla del espesor y el precio de cada material.

**Tabla 21**

*Especificaciones y resultados obtenidos en el software MATLAB de cada material para el caso dos.*

Material	Espesor (mm)	Espesor comercial	Perdidas por absorción (dB)	Perdidas por reflexión (dB)	Precio (US\$)	Dimensiones en metros
Hierro	0.924	Calibre 20 (0.9 mm)	27.43	24.2824	13	1 x 2.4
Acero	8.511	Calibre 14 (1.8 mm)	27.403	24.9882	15	1.2 x 0.6

Nota. Información de precio y dimensiones (Maploca, 2022).

Con estos valores de la tabla 21 podemos observar que la de menor espesor fue el hierro y la de mayor espesor fue el acero, analizando los distribuidores de este material podemos definir el calibre de la lámina a usar en cada caso, para la lámina de hierro se usaría un calibre 20 de 0.9 mm de espesor y para la lámina de acero, debido a que su espesor fue muy grande se usaran cinco capas de un calibre 14 con 1.8 mm de espesor (Maploca, 2022). El precio de cada una de estas nos permiten concluir que la mejor opción es el hierro, debido a que con acero debemos utilizar varias capas aumentando el costo por lamina y dificultando su instalación, se concluye que la mejor opción es este. Se procede a modificar la simulación añadiendo esta lámina y observar sus resultados.

Para el tercer y último caso de estudio del nivel de tensión de 220-127 V del cableado que va del transformador al tablero general de baja tensión, se estima reducir la intensidad de campo

magnético a  $1 \mu\text{T}$ , lo que quiere decir una efectividad del blindaje de 30.5311 dB según ecuación (1).

$$S = 20 \log \frac{33.617}{1} = 30.5311 \text{ dB}$$

Para la ubicación de la lámina se realizaran dos pruebas, la primera será reemplazando la tubería por una metálica ya que esta distancia es corta, si esta opción no reduce el campo magnético en la simulación se procede con la segunda opción de instalar la lámina. Para la lámina se realiza el mismo procedimiento utilizado en el primer caso usando las ecuaciones (7) y (8), instalando la lámina sobre la tubería a 84 mm del centro de esta, introduciéndola en el hormigón del suelo, con esto obtenemos la siguiente tabla del espesor y el precio de cada material en caso que la primera opción no funcione.

**Tabla 22**

*Especificaciones y resultados obtenidos en el software MATLAB de cada material para el caso tres.*

Material	Espesor (mm)	Espesor comercial	Perdidas por absorción (dB)	Perdidas por reflexión (dB)	Precio (US\$)	Dimensiones en metros
Hierro	1.229	Calibre 20 (0.9 mm)	36.496	6.1819	13	1 x 2.4
Acero	11.193	Calibre 14 (1.8 mm)	36.035	6.8877	15	1.2 x 0.6

Nota. Información de precio y dimensiones (Maploca, 2022).

Con estos valores de la tabla 22 podemos observar que la de menor espesor fue el hierro y la de mayor espesor fue el acero, analizando los distribuidores de este material podemos definir el calibre de la lámina a usar en cada caso, para la lámina de hierro se usaría un calibre 20 de 0.9 mm

de espesor y para la lámina de acero, debido a que su espesor fue muy grande se usaran siete capas de un calibre 14 con 1.8 mm de espesor (Maploca, 2022). Se decide el calibre del hierro igual al caso dos, con el fin de introducirlo en la simulación y verificar si puede mitigar el campo magnético y realizar una compra homogénea. El precio de cada una de estas nos permiten concluir que la mejor opción es el hierro, debido a que con acero debemos utilizar varias capas aumentando el costo por lamina y dificultando su instalación, se concluye que la mejor opción es el hierro. Se procede a modificar la simulación añadiendo esta lámina y observar sus resultados.

#### 4.3. Resultados de simulación con el escudo

Una vez seleccionado el material, el espesor y la ubicación del escudo de cada caso de estudio se procede a configurarlo en el software COMSOL para su simulación y verificación de la atenuación del campo magnético. Para la configuración necesitaremos algunas propiedades de los dos materiales a utilizar establecidos en la tabla 23, para la tubería metálica que usaremos en el tercer caso de estudio será de acero y se cambiara el material en la simulación para obtener los resultados, en cuanto a las láminas que se usaran todas serán de hierro.

**Tabla 23**

*Propiedades específicas de materiales para el escudo a utilizar en la simulación.*

Material	Permitividad relativa ( $\epsilon_r$ )	Conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) (S/m)	Permeabilidad relativa ( $\mu_r$ )
Hierro	1	$1,12 \times 10^7$	5000
Acero	1	$0,116 \times 10^7$	500

Nota. Información tomada de Torres Velásquez J. A., Viáfara Avila R. R., Chacón Cardona C. A.

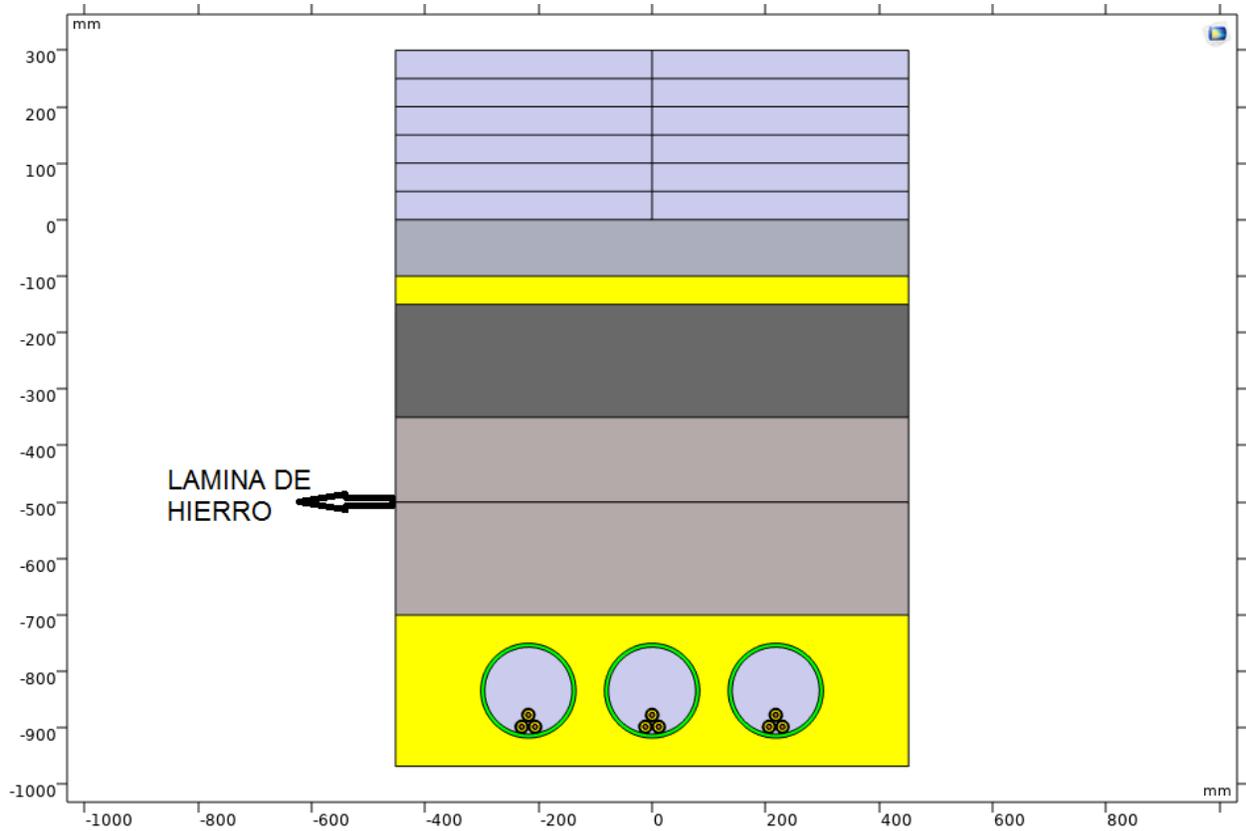
(2016). *Estudio de blindaje magnético en materiales conductores en función de la frecuencia.*

Revista Ciencia en Desarrollo, Vol. 7 No. 1.

Para el primer caso de estudio los resultados obtenidos con la instalación de la lámina de hierro calibre 29 a 250 mm por encima de la tubería en la simulación fueron los siguientes.

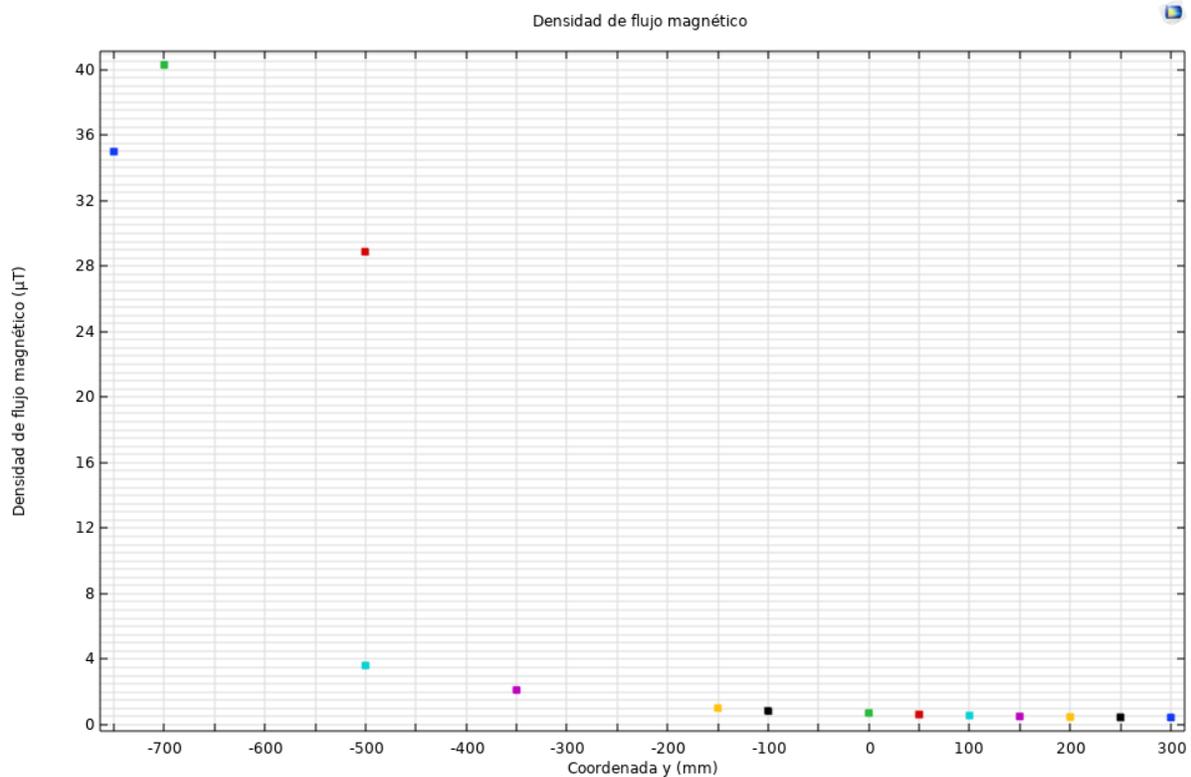
**Figura 34**

*Ubicación de la lámina para el caso uno.*



**Figura 35**

*Gráfica de la mitigación del flujo magnético en diferentes puntos para el caso uno.*

**Tabla 24**

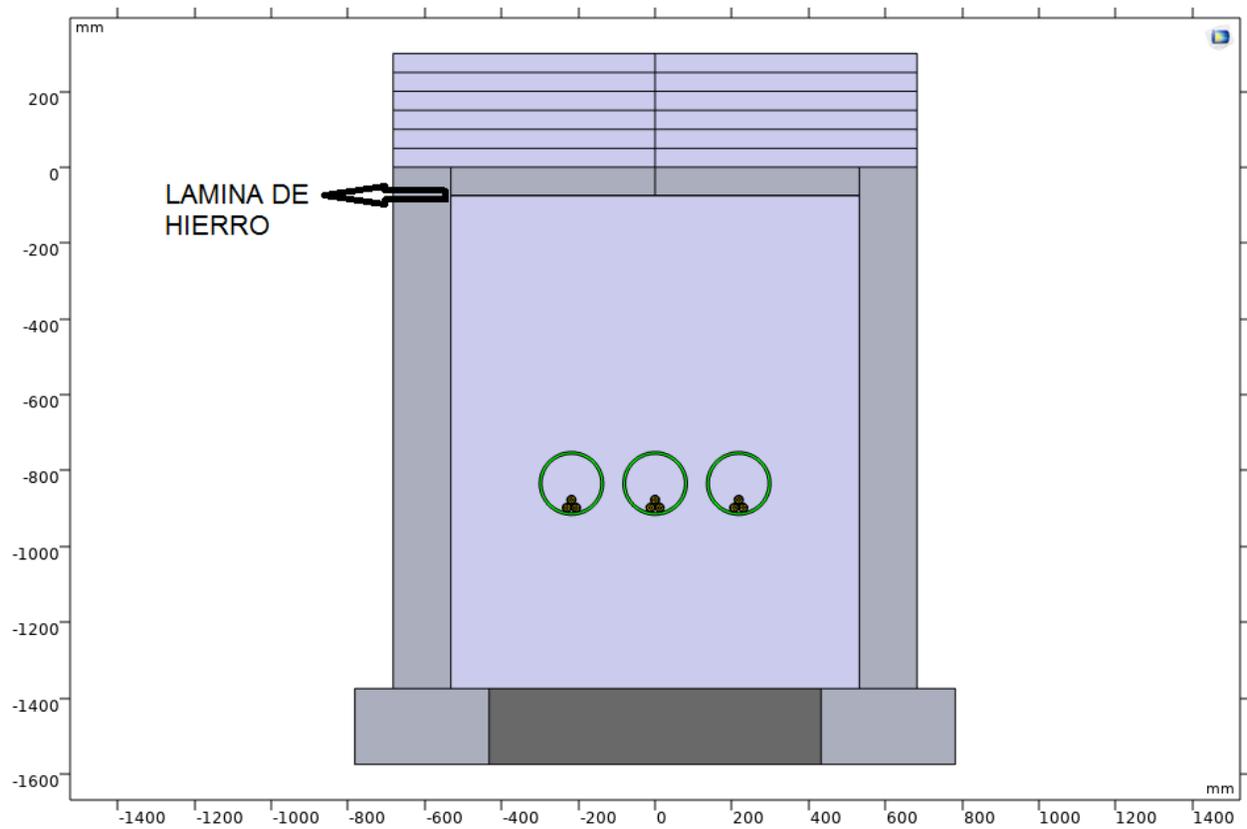
*Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 35.*

Coordenada Y (mm)	Densidad de flujo magnético (μT)
-750.00	34.993
-700.00	40.286
-500.35	28.879
-500.00	3.6259
-350.00	2.1271
-150.00	1.0245
-100.00	0.84445
0.0000	0.71447
50.000	0.62814
100.00	0.56078
150.00	0.51039
200.00	0.47546
250.00	0.45491
300.00	0.44847

Para el segundo caso de estudio los resultados obtenidos con la instalación de la lámina de hierro calibre 20 a 675 mm por encima de la tubería en la tapa de la caja de inspección en la simulación fueron los siguientes.

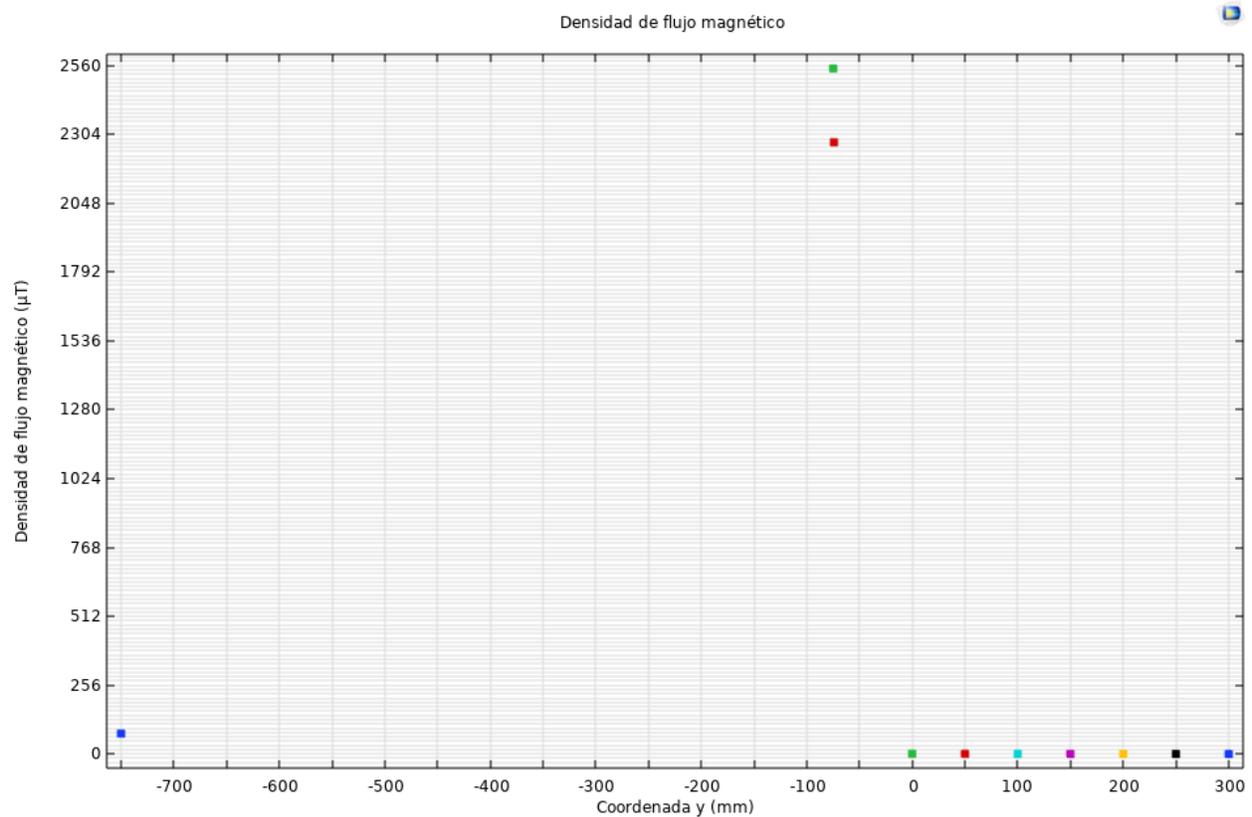
### Figura 36

*Ubicación de la lámina para el caso dos.*



**Figura 37**

Gráfica de la mitigación del flujo magnético en diferentes puntos para el caso dos.

**Tabla 25**

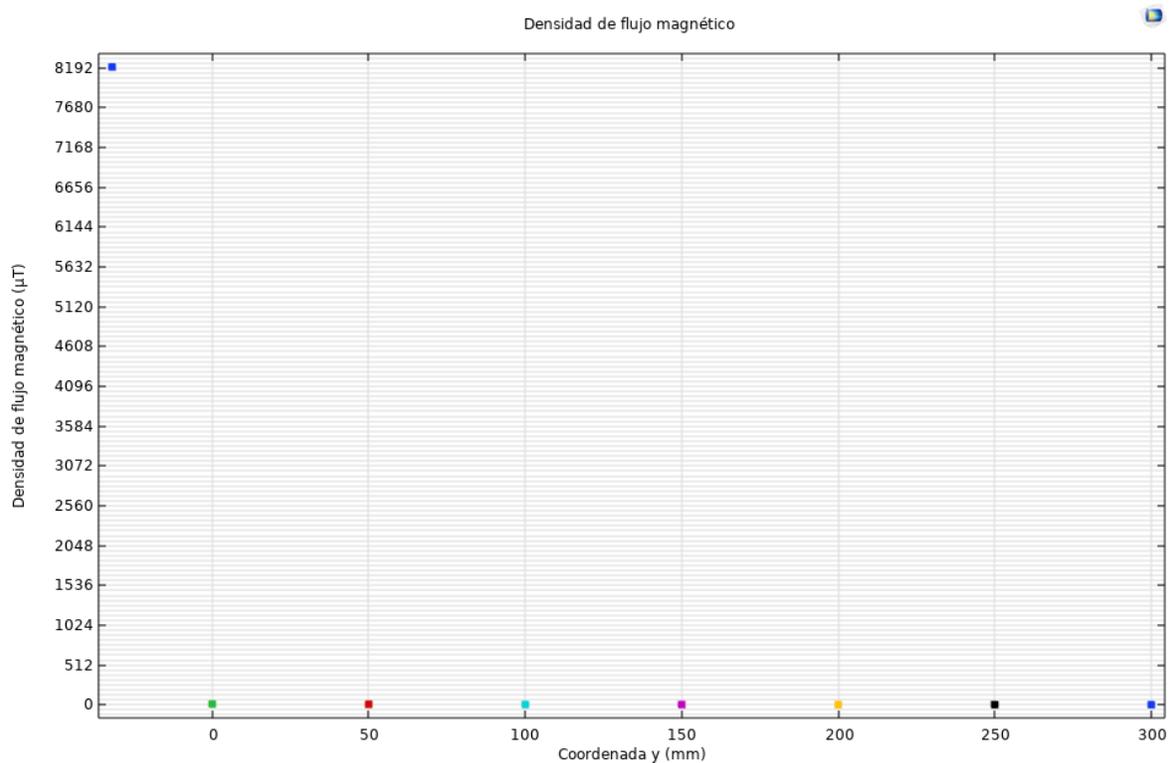
Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 37.

Coordenada Y (mm)	Densidad de flujo magnético (µT)
-750.00	76.008
-75.00	2549.4
-74.100	2275.0
0.0000	1.0364
50.000	0.86089
100.00	0.71507
150.00	0.60139
200.00	0.52065
250.00	0.47291
300.00	0.45784

Para el tercer caso de estudio los resultados obtenidos con el cambio del tipo de tubería por una metálica de acero en la simulación fueron los siguientes.

### Figura 38

Gráfica de la mitigación del flujo magnético en diferentes puntos para el caso tres con cambio de tubería.



### Tabla 26

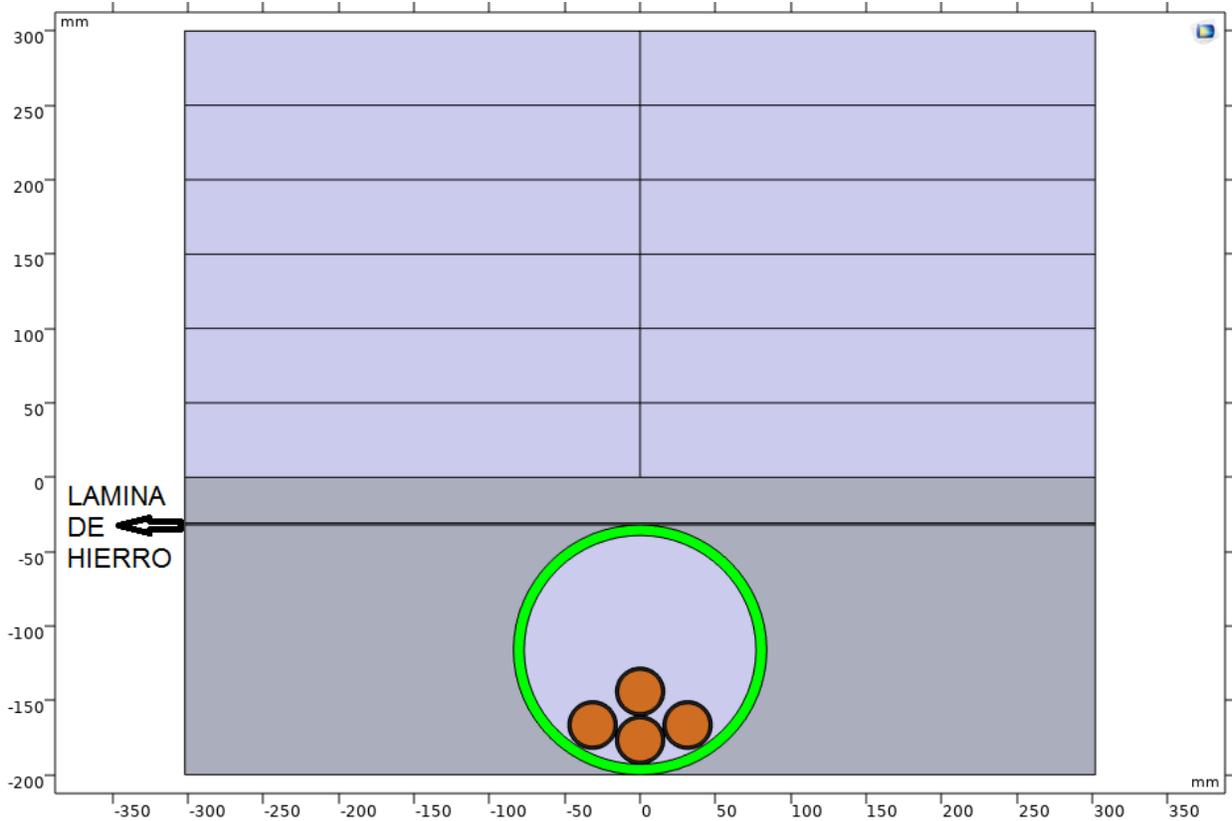
Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 38.

Coordenada Y (mm)	Densidad de flujo magnético (µT)
-32.00	8206.5
0.0000	11.718
50.0000	7.5329
100.00	5.4157
150.00	4.2061
200.00	3.4970
250.00	3.1187
300.00	3.0016

Para el tercer caso de estudio los resultados obtenidos con la instalación de la lámina de hierro calibre 18 justo por encima de la tubería de PVC en la simulación fueron los siguientes.

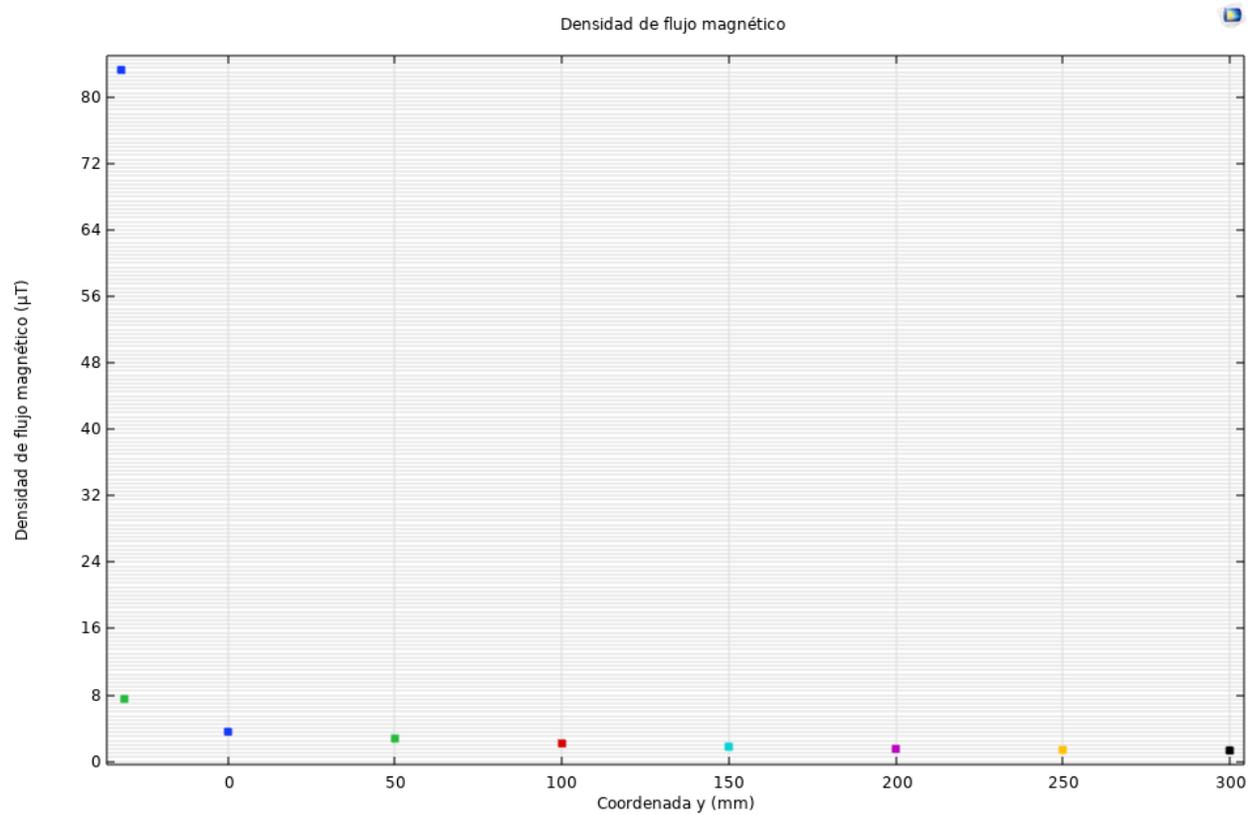
### Figura 39

*Ubicación de la lámina para el caso tres.*



**Figura 40**

Gráfica de la mitigación del flujo magnético en diferentes puntos para el caso tres.

**Tabla 27**

Magnitud del flujo magnético en diferentes puntos de la gráfica de la figura 40.

Coordenada Y (mm)	Densidad de flujo magnético ( $\mu\text{T}$ )
-32.00	83.270
-31.100	7.5392
0.0000	3.5831
50.000	2.7574
100.00	2.1776
150.00	1.7817
200.00	1.5239
250.00	1.3785
300.00	1.3323

### 5. Análisis de resultados finales

Para el primer caso de estudio los resultados obtenidos en la simulación con la incorporación del escudo, nos permiten evidenciar una reducción del campo magnético de 79% con respecto a su valor inicial con una corriente máxima de 155 A, esto garantiza que para valores inferiores de corriente el blindaje garantiza su funcionamiento. Con respecto al valor que se esperaba obtener de campo magnético a los 30 cm que era de 1  $\mu\text{T}$ , el software mostro un error de 55% debido principalmente a la selección del espesor comercial de la lámina y los datos característicos de los materiales introducidos en el software, valor que es aceptable para este caso, debido a que el conductor muy pocas veces alcanzara este valor máximo de corriente y dependerá de la carga que opere en cada instante de tiempo. Para llevar a cabo la instalación de esta lámina el costo se aumenta 2.5 US\$ por cada metro de canalización, necesitando una lámina para 2 metros de instalación y se necesitara cubrir la zona del andén y la conexión que lleva al transformador dentro del edificio.

**Tabla 28**

*Tabla comparativa de resultados para el caso uno.*

Campo magnético antes de la instalación del escudo ( $\mu\text{T}$ )	Campo magnético después de la instalación del escudo ( $\mu\text{T}$ )	Precio por metro de canalización (US\$)	Porcentaje de disminución (%)	Porcentaje de error del software (%)
2.1933	0.44847	2.5	79	55

Para el segundo caso de estudio los resultados obtenidos en la simulación con la incorporación del escudo, nos muestran una reducción de 97% del campo magnético con respecto a su valor inicial con una corriente máxima de 155 A, para este caso de estudio el software arrojo

un error de 55%, con base en el valor que se esperaba obtener de 1  $\mu\text{T}$ , pero este es aceptable pues fue por debajo de 1  $\mu\text{T}$ . El costo para esta instalación es de 13 US\$ para una lámina completa, pues solo es requerida en la caja de inspección y garantiza que para valores de corrientes inferiores a la máxima, las personas estarán protegidas.

### Tabla 29

*Tabla comparativa de resultados para el caso dos.*

Campo magnético antes de la instalación del escudo ( $\mu\text{T}$ )	Campo magnético después de la instalación del escudo ( $\mu\text{T}$ )	Precio por metro de canalización (US\$)	Porcentaje de disminución (%)	Porcentaje de error del software (%)
12.491	0.45784	13	97	55

Para el tercer caso de estudio se realizaron dos simulaciones para dos diferentes alternativas para la mitigación del campo magnético, la primera alternativa es realizar el cambio de tubería de PVC a metálica, específicamente en acero, mostrando una reducción de 91% del campo magnético con respecto a su valor inicial para una corriente máxima de 1055 A, la segunda alternativa fue la instalación del escudo con una lámina de hierro, reduciendo un 96% el valor del campo magnético, comparando las dos alternativas de mitigación la que garantiza una máxima disminución al valor deseado de 1  $\mu\text{T}$ , es la instalación de la lámina de hierro, verificando además que el calibre de la lámina seleccionado cumple con la disminución deseada, al realizar el cambio por una tubería de acero se puede presentar calentamiento del material por las corrientes inducidas en el ciclo de magnetización y causar daños posteriores al cableado interno, provocando futuras fallas en la instalación, por esto no se toma esta opción.

**Tabla 30**

*Tabla comparativa de resultados para el caso tres con cambio de tubería.*

Campo magnético antes de la instalación del escudo ( $\mu\text{T}$ )	Campo magnético después de la instalación del escudo ( $\mu\text{T}$ )	Campo magnético con cambio de tubería ( $\mu\text{T}$ )	Diferencia ( $\mu\text{T}$ )
33.617	1.3323	3.0016	1.6693

Para el caso de la instalación de la lámina de hierro, el software evidencio un error de 33% con respecto al valor que se espera obtener de 1  $\mu\text{T}$ , pero aceptable ya que en muy pocas oportunidades se alcanzara este valor máximo de corriente. El costo en la incorporación de esta lámina será de 3.25 US\$ por metro de canalización que en muchas ocasiones son tramos cortos, lo que quiere decir una lámina completa de 13 US\$ para una instalación de 4 metros, garantizando una ganancia de material sobrante de 2 metros del caso dos para ser usados en este caso.

**Tabla 31**

*Tabla comparativa de resultados para el caso tres con instalación de la lámina.*

Campo magnético antes de la instalación del escudo ( $\mu\text{T}$ )	Campo magnético después de la instalación del escudo ( $\mu\text{T}$ )	Precio por metro de canalización (US\$)	Porcentaje de disminución (%)	Porcentaje de error del software (%)
33.617	1.3323	3.25	96	33

## Conclusiones

La actual normatividad colombiana cuenta con escasa documentación para el cálculo, y medida de campos electromagnéticos en cableado eléctrico subterráneo, causando gran preocupación al respecto debido a que dichas instalaciones están empezando a ser más comunes en nuestro entorno.

Los niveles límites de exposición a campos electromagnéticos establecidos en estándares internacionales, los cuales son la base para la normatividad colombiana, requieren de ajustes que se acoplen a nuevos estudios científicos que permitan evidenciar posibles afectaciones a la salud humana e interferencia con el funcionamiento de equipos eléctricos y electrónicos que producen estos campos generados por el cableado subterráneo encargado de la distribución de la energía eléctrica y cuya ubicación se encuentra muy cerca de nuestra integridad, estos límites tan altos, en muy pocas ocasiones logran ser alcanzados y se basan en mediciones de líneas aéreas. Colombia puede llevar a cabo estudios de este tipo y modificar estos niveles atendiendo a organismos de países internaciones como se realizó en este trabajo.

Con la ayuda del software de simulación COMSOL Multiphysics, se pudieron establecer los niveles de campo magnético para diferentes casos de estudio con anterioridad a su instalación, esto es de gran apoyo para el modelamiento de diferentes tipos de cableados y medios, permitiendo de esta manera anticipar valores límites que pudieran ser sobrepasados. Se recomienda la adquisición de este software por parte de la universidad para ayudar con la comprensión del comportamiento de procesos multifísicos y ser usado en proyectos posteriores para diversas áreas de la ingeniería.

Los diferentes casos de estudios establecidos como guía para la realización del proyecto fueron instalaciones de media y baja tensión, las cuales son muy frecuentes y se realizan muy cerca donde se presenta tránsito permanente de personas. Para proyectos posteriores se sugiere un trabajo más a fondo con la incorporación de estudios de cargas para establecer el cableado y la corriente específica de cada instalación, así como los datos reales con medición de los medios y los materiales que se utilizan y con esto ser más riguroso al momento de usar el software de simulación.

Con base en los resultados obtenidos en la simulación de los casos de estudio se evidenció que todos cumplían con la reglamentación nacional en cuanto a límites máximos de exposición a campos magnéticos, pero se decidió realizar el diseño del escudo para algunos de estos casos con el fin de mitigar estos valores siguiendo normativas internacionales, de países que han sido más rigurosos con estos límites y ser una guía para el ajuste a futuro de estos en nuestro país.

En la realización del diseño del escudo con la ayuda del software de simulación y la teoría electromagnética se pudo observar el funcionamiento de estos y comprobar que cumplían con su requisito de mitigar los valores de campo magnético a cierta altura de medida, que fueron 30 centímetros, con esto se puede cumplir con la normativa internacional que se seleccionó para la protección de la salud y los equipos para valores inferiores a esas corrientes máximas de cada caso de estudio. Para estudios posteriores se pueden realizar simulaciones en 3 dimensiones con un equipo más avanzado y determinar algunas otras características a mejorar.

Debido a la selección comercial de la lámina y las características propias de cada material a configurar en el software se pudo evidenciar un porcentaje de error con respecto al valor de  $1 \mu\text{T}$  que se esperaba obtener, pero se logró el objetivo de reducir dichos valores iniciales de campo magnético para cada caso de estudio.

### Referencias bibliográficas

Aaronia AG. (2015). *Analizadores de espectro para campo E y H. Línea SPECTRAN® NF.*

Alonso Fustel E., Garcia Vázquez R., Onaindia Olalde C. (2011). *Campos electromagnéticos y efectos en salud.* Subdirección de Salud Pública de Bizkaia.

Balcells J., Daura F., Esparza R., Pallas R. (1992). *Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Eléctricos.* Alfaomega Marcombo.

Burgos Sequeda O. A., Lobelo Diaz A. (2004). *Estudio de los campos magnéticos producidos por subestaciones de distribución a 13.2 kV y los problemas que ocasionan en equipos electrónicos y personas.* Universidad Tecnológica De Bolívar - Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica Y Mecatrónica. Cartagena de Indias.

CENTELSA. (2008). *Cables para media tensión.* Cables y tecnología. Boletín técnico.

COMSOL. (1988-2022). COMSOL Multiphysics. [www.comsol.com](http://www.comsol.com).

Concha Vielma G. A., (2010). *Interacción de campos electromagnéticos de extra baja frecuencia con el cuerpo humano. Mediciones de campo magnético en instalaciones de media tensión.* Universidad De Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento Ingeniería Eléctrica.

Empresa de Energía del Casanare S.A. E.S.P. (2017). *Norma de construcción de redes de media y baja tensión.* ENERCA S.A. E.S.P Yopal – Casanare.

Empresas Públicas De Medellín ESP. (2013). *Normas para redes subterráneas. Canalización de redes de energía 13.2 kV.* Código RS1-006.

Empresas Públicas De Medellín ESP. (2019). Guía Metodológica: *Cálculo de campos electromagnéticos en redes de distribución. EPM-UCET-NYL-GM-07*. Unidad Centro de Excelencia Técnica Normalización y Laboratorios.

Empresas Públicas De Medellín ESP. (2019). Guía Metodológica: *Norma Técnica: Medición de campos electromagnéticos en redes de distribución. EPM-UCET-NYL-NT-07*. Unidad Centro de Excelencia Técnica Normalización y Laboratorios.

ESSA. (s.f.). *Norma técnica ESSA*. Bucaramanga: ESSA.

EVALCON SAS. (2019). *Documento interno - medida campos electromagnéticos*.

Hayt W. H., Buck J. A. (2006). *Teoría electromagnética*. McGraw-Hill/Interamericana.

IEEE Standards Board. (1995). *IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Il Presidente del Consiglio dei Ministri. (2003). *Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti*. Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri. Repubblica italiana.

Ippolito M. G., Puccio A., Ala G., Ganci S., (2015). *Attenuation of Low Frequency Magnetic Fields Produced by HV Underground Power Cables*. DEIM, Università degli. Palermo, Italy

Khouildi E., Attia R., Chtourou N. (2016). *Numerical modeling of the electric field and the potential distributions in heterogeneous cavities inside XLPE power cable insulation*. University of Carthage, Tunisia.

Kunsch. B., (1996). *The european pre-standard env 50166 "human exposure to electromagnetic fields" in perspective*. Austrian Research Centre Seibersdorf, A-2444 Seibersdorf.

Maploca. (2022). *Materiales de Plomería C.A. Productos – Laminas*.  
<https://maploca.com/productos/laminas>.

Mehrdad Frooi J., Mohamad Hosein O., Roohalamin Zeinali D. (2017). *Detection of underground power cable route using magnetic field*. Department of Electrical and Computer Engineering. Kerman Iran.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá D.C., Colombia. Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes.

Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Anexo General Reglamento Técnico de instalaciones eléctricas RETIE*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energía.

PDE Solutions Inc. (2021). *FlexPDE 7*.

Revueltas Agüero M., Gutiérrez Soto T. (2017). *Los campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja y su influencia en la salud humana: un tema polémico*. Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología (INHEM). La Habana, Cuba.

Ruz Ruiz M., Vázquez Serrano F., Cubero Atienza A. J., Salas Morera L., Jiménez Hornero J. E., Arauzo Azofra A., Cubero Atienza J. R., García Hernández L., Redel Macías M. D.,

Garrido Jurado J. (2010). *Efectos sobre la salud humana de los campos magnéticos y eléctricos de muy baja frecuencia (elf)*. Junta de Andalucía. Consejería de Empleo.

Serway R. A., (1997). *Física Tomo II, Cuarta edición*. McGraw HILL México.

Solano Vérez M. Á., Sáiz Ipiña J. (s.f.). *Conceptos básicos de campos electromagnéticos de baja frecuencia*. Universidad de Cantabria.

Steinmann I. B., Fernández J. P., Manassero U. (2013). *Campos electromagnéticos en sistemas de transmisión de energía eléctrica*. UTN – Facultad Regional Santa Fe. Grupo de Investigación Sistemas Eléctricos de Potencia GISEP.