

**ESTUDIO DE LA INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA EN LA  
SERVIDUMBRE DE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN**

**LUIS MIGUEL HERNÁNDEZ LIZARAZO  
WILMER VELANDIA LADINO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELAS DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

**ESTUDIO DE LA INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA EN LA  
SERVIDUMBRE DE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN**

**LUIS MIGUEL HERNÁNDEZ LIZARAZO  
WILMER VELANDIA LADINO**

**Trabajo de grado para optar al título de:  
Ingeniero Electricista**

**Director:  
JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO  
Ingeniero Electricista, M.P.E**

**Codirector:  
EDISON ANDRÉS SOTO RÍOS  
Ingeniero Electricista, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELAS DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIA

*A Dios por permitirme iniciar y culminar de manera exitosa esta etapa de mi vida profesional y por llenarme de salud, sabiduría y fortaleza durante todo mi proceso universitario.*

*A mis padres, María Oliva y Luis Hernández por ser mi más grande motivación, por creer en mí y por ser mi mayor apoyo.*

*A mis hermanas Erika Paola y Karen Tatiana por su apoyo constante.*

*A mi sobrina Valery Sofía y a mi Sobrino Daniel Santiago porque con su alegría me llenaron de energía justo en el momento que lo necesitaba.*

*A Lina Sthefany Conde por su compañía, apoyo incondicional y sus palabras de aliento en los momentos más difíciles.*

*A mis familiares que siempre me llenaron de actitud positiva y motivación.*

*A todos mis amigos y compañeros que formaron parte de esta etapa y de los cuales aprendí muchas cosas.*

*Luis Miguel Hernández*

## DEDICATORIA

*Principalmente a Dios, por darme la fortaleza cuando he caído y permitirme culminar con éxito esta etapa.*

*A mis padres José Velandia y Martha Ladino por su amor, paciencia y sacrificio en todos estos años, por sus principios y valores, por alentarme y motivarme cuando lo necesite, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.*

*A mi hermanos Laura Marcela y José Joaquín, por ser mi motivación, por haber estado en los momentos difíciles y apoyarme cuando más lo necesitaba para poder alcanzar cada meta.*

*A los miembros de mi familia, por sus voces de aliento y superación, en especial a mi tía Claudia Ladino, por ser esa amiga incondicional en una etapa difícil de mi vida, por sus palabras de experiencia y sabiduría; por su motivación y acompañamiento en este proceso.*

*A mis amigos Fabian Tello, Fernanda Vasquez, Jeisson Morales y Yerson Suarez, por estar presentes en los buenos y malos momentos.*

*A mis compañeros universitarios, por el trabajo en equipo, por las experiencias vividas, por su solidaridad, tolerancia y comprensión.*

*Por último, a cada persona que hizo parte de este proceso de formación profesional y personal, todo este trabajo ha sido posible gracias a ustedes.*

*Wilmer Velandia*

## AGRADECIMIENTOS

*Los autores del proyecto ofrecen su agradecimiento a:*

*A la Universidad Industrial de Santander por formarnos como profesionales y como personas críticas con responsabilidad social.*

*Al director del proyecto el profesor Julio César Chacón por su apoyo y orientación en cada una de las etapas de desarrollo de este proyecto.*

*Al codirector del proyecto profesor Edison Andrés Soto por su asesoría y disposición para este trabajo.*

# CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	16
1. MARCO TEÓRICO.....	18
1.1 CAMPO ELÉCTRICO .....	18
1.2 CAMPO MAGNÉTICO.....	18
1.3 CAMPO ELECTROMAGNÉTICO .....	19
1.4 INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA.....	20
1.5 MECANISMOS DE ACOPLAMIENTO .....	23
2. INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA Y SOLUCIONES DE MITIGACIÓN ENTRE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN Y OTROS SISTEMAS .....	24
2.1 IEM CON EL SISTEMA FERROVIARIO.....	24
2.1.1 Perturbaciones a locomotoras diésel .....	26
2.2 SOLUCIONES DE MITIGACIÓN PARA EL SISTEMA FERROVIARIO....	30
2.3 IEM CON EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	30
2.4 SOLUCIONES DE MITIGACIÓN PARA EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN .....	32
2.5 IEM CON SISTEMAS DE TUBERÍA.....	33
2.6 SOLUCIONES DE MITIGACIÓN PARA EL SISTEMAS DE TUBERÍA.....	36
2.7 CASOS DE ESTUDIO .....	37
2.7.1 Sistemas ferroviarios.....	37

2.7.2	Sistemas de distribución .....	38
2.7.3	Sistemas de tuberías.....	38
3.	CÁLCULO Y MITIGACIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO .....	41
3.1	CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO .....	41
3.2	MITIGACIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO.....	45
4.	PRESENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE <i>PERMAG</i> .....	51
4.1	PRESENTACIÓN DE la herramienta <i>PERMAG</i> .....	51
4.1.1	Diagrama de flujo .....	52
4.2	VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL <i>PERMAG</i> .....	56
4.2.1	Caso 1.....	56
4.2.2	Caso 2.....	59
4.2.3	Caso 3 y Caso 4.....	62
5.	CONCLUSIONES.....	68
	REFERENCIAS .....	70
	BIBLIOGRAFÍA.....	72
	ANEXOS.....	74

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes de la IEM. ....	21
Figura 2. Tipos de propagación de las IEM. ....	23
Figura 3. Línea de alta tensión y sistema ferroviario con servidumbre compartida. .....	25
Figura 4. Inducción de tensiones por medio de campos eléctricos.....	26
Figura 5. Inducción de corrientes por medio de campos magnéticos. ....	27
Figura 6. Tensiones acopladas por medio de la conducción. ....	28
Figura 7. Línea de alta tensión y red de distribución compartiendo zona de servidumbre. ....	31
Figura 8. Línea de alta tensión y tubería compartiendo zona de servidumbre.....	34
Figura 9. Ilustración de la Ley de Ampère para un conductor de fase de la línea de transmisión respecto a un punto de medida. ....	42
Figura 10. Línea de transmisión y bucle. ....	45
Figura 11. Implementación del bucle pasivo en una línea real. ....	46
Figura 12. Campo magnético del bucle contrarrestando el de la línea. ....	46
Figura 13. Coordenadas del conductor de fase y bucle. ....	48
Figura 14. Línea de transmisión trifásica de 345 kV en configuración horizontal circuito sencillo.....	56
Figura 15. Datos de entrada de la línea de transmisión trifásica de 345 kV, en configuración horizontal circuito sencillo en <i>PERMAG</i> . ....	57
Figura 16. Comparación de perfiles de densidad de flujo magnético obtenido a 1 m por encima del suelo, para la línea trifásica de 345 kV, en configuración horizontal. .....	58
Figura 17. Configuración geométrica de la línea de transmisión trifásica de 150 kV con bucle pasivo, en configuración vertical doble circuito.....	60

Figura 18. Datos de entrada de la línea de transmisión trifásica de 150 kV, en configuración vertical doble circuito, con los circuitos en el siguiente orden: circuito 1 (A, B, C) y circuito 2 (C, B, A), con y sin blindaje en <i>PERMAG</i> .....	61
Figura 19. Comparación de perfiles de densidad de flujo magnético obtenido a nivel del suelo (0 m), para la línea de transmisión trifásica de 150 kV, en configuración vertical doble circuito, con el circuito 1 = A, B, C y circuito 2 = C, B, A.....	61
Figura 20. Configuración geométrica y características eléctricas de los conductores de las líneas de transmisión analizadas. ....	63
Figura 21. Datos de entrada de la línea de transmisión trifásica de 750 kV, en configuración horizontal, con y sin blindaje, en <i>PERMAG</i> . ....	64
Figura 22. Comparación de los perfiles de reducción de densidad de flujo magnético con respecto al caso sin blindaje a 1 m de altura sobre el nivel del suelo, para la línea de transmisión trifásica de 750 kV, en configuración horizontal. ....	65
Figura 23. Datos de entrada de la línea de transmisión trifásica de 220 kV, en configuración vertical doble circuito, con los circuitos en el siguiente orden: circuito 1 (A, C, B) y circuito 2 (B, C, A), con y sin blindaje, en <i>PERMAG</i> .....	66
Figura 24. Comparación de los perfiles de reducción de densidad de flujo magnético con respecto al caso sin blindaje a 1 m de altura sobre el nivel del suelo, para la línea de transmisión trifásica de 220 kV, en configuración vertical doble circuito, con los circuitos en el siguiente orden: circuito 1 ( A, C, B) y circuito 2 (B, C, A). ....	67

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Valores límites de exposición a campos electromagnéticos. ....	20

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. MANUAL DE USO DE LA HERRAMIENTA <i>PERMAG</i> .....	74

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DE LA INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA EN LA SERVIDUMBRE DE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN\*

**AUTORES:** LUIS MIGUEL HERNÁNDEZ LIZARAZO  
WILMER VELANDIA LADINO\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Compatibilidad electromagnética, interferencia electromagnética, línea de alta tensión, uso compartido de la zona de servidumbre, campo magnético, bucle pasivo.

### DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de grado presenta en el primer capítulo un marco teórico en el cual se mencionan los aspectos más relevantes del ambiente electromagnético. En el segundo capítulo se revisan los problemas de compatibilidad electromagnética que generan las líneas de alta tensión a otros sistemas (vías de ferrocarril, redes de distribución y tuberías) dispuestos dentro de la zona de servidumbre. De igual forma, se revisan soluciones de mitigación que permiten disminuir la interferencia electromagnética causada por las líneas de alta tensión a estos sistemas. También se describen algunos casos publicados en el IEEE.

En el tercer capítulo se presenta un método para determinar la densidad de flujo magnético generado por una línea de alta tensión. Adicionalmente, se describe un método de blindaje que permite mitigar la densidad de flujo magnético producido por la línea. Con el fin de disponer de una herramienta software libre con una interfaz gráfica entendible, las metodologías se implementan en una herramienta computacional llamada perfil de densidad de flujo magnético (*PERMAG*), la cual permite simular de manera rápida y efectiva la densidad de flujo magnético producido por la línea de alta tensión. En el cuarto capítulo se describe el algoritmo de la herramienta *PERMAG* y se validan sus resultados comparándolos con casos publicados por el EPRI y el IEEE.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Director, MPE. Julio Cesar Chacón Velasco. Codirector, PhD. Edison Andrés Soto Ríos.

## SUMMARY

**TITLE:** STUDY OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN RIGHT-OF-WAY OF HIGH VOLTAGE LINE \*

**AUTHORS:** LUIS MIGUEL HERNÁNDEZ LIZARAZO  
WILMER VELANDIA LADINO \*\*

**KEYWORDS:** Electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, line of high voltage, shared use of the Right-of-Way, magnetic field, passive loop.

### DESCRIPTION

This degree work presents in the first chapter a theoretical framework in which the most important aspects of the electromagnetic environment are mentioned. In the second chapter, electromagnetic compatibility problems are reviewed, which are generated by high-voltage lines to other systems (railways, pipelines and distribution networks). These systems are disposed within the bonded area. Similarly, mitigation solutions are reviewed, which help decrease electromagnetic interference caused by high voltage line to these systems. Additionally, some cases published in IEEE are described.

The third chapter describes a method to determine the density of magnetic flux generated by a high voltage line. Additionally, a shielding method is described, which mitigates the magnetic flux density produced by the line. In order to have a free software tool with an understandable graphical interface, methodologies are implemented, with a computational tool called profile magnetic flux density (*PERMAG*), which simulates quickly and effectively the magnetic flux density produced by the high voltage line. The fourth chapter describes the algorithm of the *PERMAG* tool, and its results are validated, comparing them with cases already published by EPRI and the IEEE.

---

\* Degree Work

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Director, MPE. Julio Cesar Chacón Velasco. Codirector, PhD. Edison Andrés Soto Ríos.

## INTRODUCCIÓN

Las líneas de transmisión de alta tensión juegan un papel muy importante dentro del sistema de potencia, ya que se encargan de transportar la energía eléctrica desde las plantas generadoras hasta las subestaciones de distribución que alimentan los lugares de consumo. Estas líneas crean un ambiente electromagnético bastante complejo en el cual intervienen diversos factores tales como: el nivel de tensión, la potencia eléctrica que transporta, la geometría de la torre, la distancia de los conductores al suelo y sus retornos por tierra. Los campos electromagnéticos se generan a varias frecuencias debido a las corrientes armónicas que circulan por la línea, pero los predominantes en cuanto a magnitud y duración son los campos a la frecuencia industrial<sup>1</sup>, por lo que se clasifican como campos de extra baja frecuencia<sup>2</sup>.

La intensidad del campo electromagnético depende de la distancia a la que se encuentre de la línea de alta tensión, es por esto que los campos son más intensos en la zona de servidumbre, que es el terreno que se deja a lo largo de la línea para garantizar una interrelación segura con el entorno.

En la actualidad ha llegado a ser común que otros sistemas se instalen cerca o dentro de la zona de servidumbre. Esta tendencia se debe principalmente a que esta zona no es nada económica, además que también se pretende disminuir el impacto ambiental a una zona determinada. Al introducir otros sistemas en la zona

---

<sup>1</sup> La frecuencia industrial es la frecuencia a la cual se genera, transmite y distribuye la energía eléctrica, (50 y 60 Hz). Para Colombia 60 Hz.

<sup>2</sup> Los campos de frecuencia extremadamente baja (campos FEB), son aquellos campos electromagnéticos variables en el tiempo cuya frecuencia esta entre 0 y 300 Hz. Son producidos por los aparatos eléctricos y las instalaciones de transporte y distribución de energía eléctrica.

de servidumbre de la línea de alta tensión, se plantea la cuestión de qué tanto pueden ser afectados debido a los altos campos electromagnéticos que allí se experimentan.

En este trabajo de grado se revisan los problemas de compatibilidad electromagnética que originan los campos electromagnéticos radiados por las líneas de alta tensión a otros sistemas (vías de ferrocarril, redes de distribución y tuberías) dispuestos dentro de la zona de servidumbre. De igual forma, se revisan soluciones de mitigación para estos problemas de compatibilidad electromagnética.

Para abordar de mejor manera esta problemática se estudia el campo magnético generado por la línea de alta tensión. Este campo es el responsable de inducir corrientes del orden de los amperios en los sistemas instalados en la zona de servidumbre. La corriente inducida en los equipos asociados a los sistemas puede causar interferencias electromagnéticas que degradan o limitan su funcionamiento normal, por esta razón, es importante conocer la intensidad del campo magnético a la que están expuestos estos equipos. En este sentido, se desarrolla una herramienta computacional de software libre y fácil de manejar llamada perfil de densidad de flujo magnético (*PERMAG*). Esta herramienta determina de manera rápida y eficiente el perfil de densidad de flujo magnético generado por la línea de alta tensión. Además, permite implementar y verificar un método de blindaje que reduce la densidad de flujo magnético producido por la línea.

## **1. MARCO TEÓRICO**

En el presente capítulo se mencionan los aspectos más relevantes que se deben tener en cuenta para comprender este trabajo de grado.

### **1.1 CAMPO ELÉCTRICO**

Los campos eléctricos son generados cuando una carga eléctrica experimenta una fuerza, dicha fuerza es un vector, pueden ser producidos por cargas en movimiento o estáticas.

Las líneas de alta tensión generan un campo eléctrico a frecuencia industrial, causado por la diferencia de tensión que existe entre los conductores de la línea y tierra. La intensidad de este campo depende de varios factores de los cuales se destacan; la tensión de operación de la línea, su configuración y la distancia de los conductores de fase al punto de medición. Por lo general se estima un campo electrostático alrededor de la línea, ya que su intensidad no depende del tiempo. La intensidad de campo eléctrico se mide en (V/m).

### **1.2 CAMPO MAGNÉTICO**

Los campos magnéticos son generados por el movimiento de cargas eléctricas, es decir, por el flujo de corriente eléctrica.

Las líneas de alta tensión generan un campo magnético a frecuencia industrial, causado por el flujo de corriente que circula por los conductores de fase. Esta corriente tiene una variación en magnitud y duración debido a la oscilación de la carga durante el día. La intensidad del campo magnético depende de varios factores de los cuales se destacan; la corriente que circula por los conductores de la línea, su configuración y la distancia de los conductores de fase al punto de medida. Por lo general se calcula un campo magnético estático alrededor de la línea, ya que su intensidad no depende del tiempo y se considera una carga constante en el día. En la teoría, se habla siempre de intensidad de campo magnético, pero en la práctica se habla de densidad de flujo magnético, la cual se mide en teslas (T) o microteslas ( $\mu\text{T}$ ). Anteriormente se hablaba del gauss (G), pero ya no se toma como unidad oficial. La equivalencia entre teslas y gauss es, ( $1 \text{ T} = 10\,000 \text{ G}$ ).

### **1.3 CAMPO ELECTROMAGNÉTICO**

Los campos electromagnéticos son una combinación de fuerzas eléctricas y magnéticas, producidas por un campo eléctrico y magnético que varían en el tiempo, por lo que se le conoce como campo electromagnético variable [3]. Este campo tiene la misma frecuencia de la corriente eléctrica que lo produce.

De acuerdo al RETIE<sup>3</sup> los valores de máxima intensidad de campo eléctrico y densidad de flujo magnético en baja frecuencia, para las zonas donde puedan permanecer personas, independientemente del tiempo de permanencia, los cuales están basados en criterios de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la

---

<sup>3</sup> RETIE, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, es un código emitido por el Ministerio de Minas y Energía que fija las condiciones técnicas que garantizan la seguridad en los procesos de generación, transmisión, transformación, distribución y utilización de la energía eléctrica en todo el territorio nacional Colombiano.

institución internacional para la protección de la población y el medio ambiente, frente a las radiaciones no-ionizantes, ICNIRP<sup>4</sup> [3], se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Valores límites de exposición a campos electromagnéticos.

TIPO DE EXPOSICIÓN	INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO (kV/m)	DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO (μT)
Exposición ocupacional en un día de trabajo de ocho horas.	8,3	1000
Exposición del público en general hasta ocho horas continuas.	4,16	200

**Fuente:** Artículo 14, Reglamento Técnico de instalaciones eléctricas (RETIE). 2013.

*Nota: La población expuesta ocupacionalmente consiste de adultos que generalmente están expuestos a campos electromagnéticos bajo condiciones conocidas y que son entrenados para estar conscientes del riesgo potencial y para tomar las protecciones adecuadas. En contraste, el público en general comprende individuos de todas las edades y de estados de salud variables, y puede incluir grupos o individuos particularmente susceptibles. En muchos casos no están conscientes de su exposición a los campos electromagnéticos.*

#### 1.4 INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA

La compatibilidad electromagnética (CEM) es la habilidad de un sistema o equipo de funcionar correctamente en un ambiente electromagnético sin provocar perturbaciones electromagnéticas no tolerables a otros sistemas de su entorno [4].

---

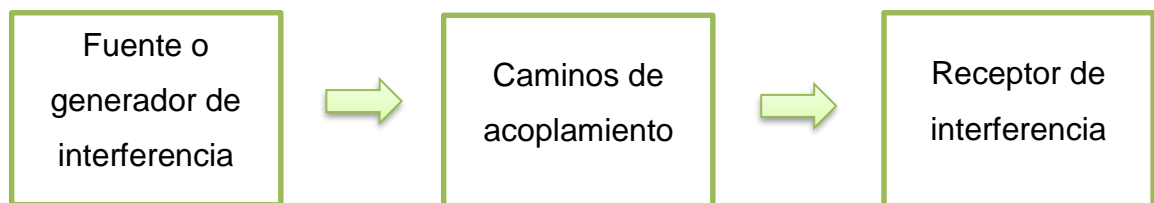
<sup>4</sup> International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

Cuando el correcto desempeño de un sistema o equipo se ve afectado por las emisiones de energía electromagnética de otro sistema, se produce una interferencia electromagnética (IEM).

La interferencia electromagnética (IEM) perturba o degrada el normal funcionamiento de un sistema eléctrico o electrónico, afectando a las magnitudes eléctricas o magnéticas (tensión, corriente o campo electromagnético), incapacitando al sistema para realizar la tarea para la cual fue diseñado.

En la figura 1 se muestra un esquema de los principales componentes que intervienen en la interferencia electromagnética.

**Figura 1.** Componentes de la IEM.



**Fuente:** [2].

Esto sugiere que en la IEM se debe analizar, cuál es la fuente de interferencia, cuál es el receptor y cuál es el camino de acoplamiento entre ellos. Hay tres modos de eliminar las IEM:

- Eliminarlas en la fuente.
- Insensibilizar el receptor.
- Disminuir la energía transmitida a través del canal de acoplamiento.

Las normas y recomendaciones internacionales<sup>5</sup> sobre IEM suelen distinguir tres tipos de receptores afectados los cuales son:

- **Dispositivos**, entendiéndose como tales los elementos o componentes más simples que intervienen en un sistema.
- **Equipos**, que son conjuntos funcionales destinados a desempeñar una función concreta.
- **Sistemas**, o conjunto de equipos destinados a realizar tareas o procesos más complejos.

Y cinco clases de efectos:

- **Clase O**: No produce mal funcionamiento del equipo o dispositivo. La perturbación no influye.
- **Clase A**: La perturbación produce efectos aceptables, pero no altera el funcionamiento del equipo o dispositivo.
- **Clase B**: La perturbación altera temporalmente el funcionamiento del equipo o dispositivo, pero este no sufre efectos irreversibles, pudiendo funcionar de nuevo sin intervención técnica.
- **Clase C**: La perturbación altera el funcionamiento del equipo o dispositivo, haciendo necesaria la intervención técnica para volver a funcionar.
- **Clase D**: La perturbación produce daños irreversibles en el equipo o dispositivo, quedando irrecuperable [1].

Conforme al artículo 11 del RETIE, los equipos objeto de este reglamento y de regulación internacional sobre compatibilidad electromagnética deben marcarse con la clase y grupo de compatibilidad electromagnética, conforme a normas internacionales o equivalentes [3].

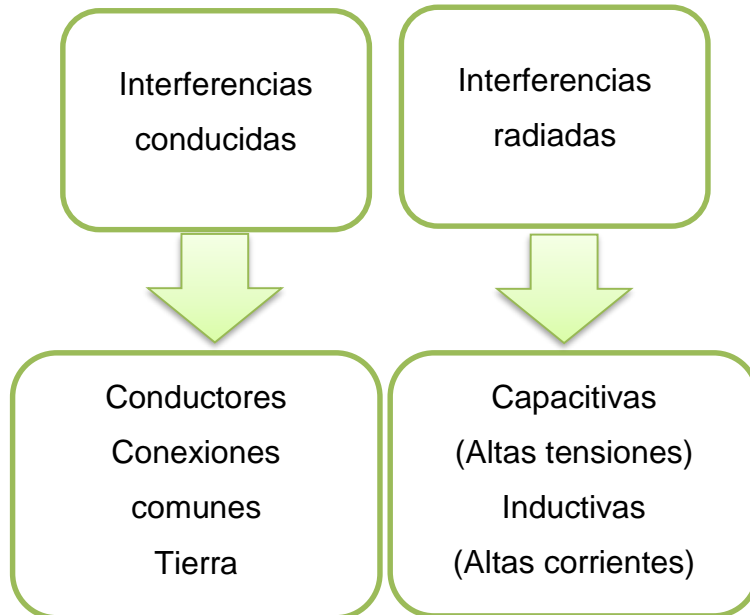
---

<sup>5</sup> Directivas Europeas 82/499 CEE y 89/336 CEE

## 1.5 MECANISMOS DE ACOPLAMIENTO

El acoplamiento de interferencias electromagnéticas se da cuando dos o más circuitos establecen una transferencia de energía no intencionada, la cuál puede ser de dos tipos como se observa en la figura 2. El acoplamiento conducido se da a través de conductores, mientras el radiado se da a través del aire.

**Figura 2.** Tipos de propagación de las IEM.



**Fuente:** [2].

## **2. INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA Y SOLUCIONES DE MITIGACIÓN ENTRE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN Y OTROS SISTEMAS**

En este capítulo, se revisan los problemas de compatibilidad electromagnética que genera la línea de alta tensión a otros sistemas (vías de ferrocarril, redes de distribución y tuberías) dispuestos dentro de la zona de servidumbre. Así mismo, se revisan soluciones de mitigación que permitan disminuir la interferencia electromagnética causada por la línea a estos sistemas. Finalmente se describen algunos casos de estudio publicados en la IEEE.

### **2.1 IEM CON EL SISTEMA FERROVIARIO**

A menudo, la zona de servidumbre de la línea de alta tensión alberga diferentes sistemas, esto debido a su viabilidad económica y al aprovechamiento de estos espacios. Uno de los sistemas que hace parte de este corredor común es el ferroviario como se muestra en la figura 3. En los últimos años este sistema se ha visto afectado por pequeños y constantes problemas de compatibilidad electromagnética que difiere en el buen funcionamiento y operatividad del mismo.

La línea de alta tensión transporta corrientes alternas que crean campos eléctricos y campos magnéticos variables en el tiempo, debido a la fluctuación de carga en el día. Estos campos generan tensiones y corrientes inducidas que pueden interferir en el funcionamiento de sistemas cercanos, tales como las vías ferroviarias, y pueden aumentar a medida que estén más cerca y paralelamente a la línea.

Por tanto, es preocupante dicha situación, tanto para la seguridad del personal de mantenimiento como para la operatividad segura de los equipos eléctricos y electrónicos asociados al sistema ferroviario.

**Figura 3.** Línea de alta tensión y sistema ferroviario con servidumbre compartida.



**Fuente:** [2].

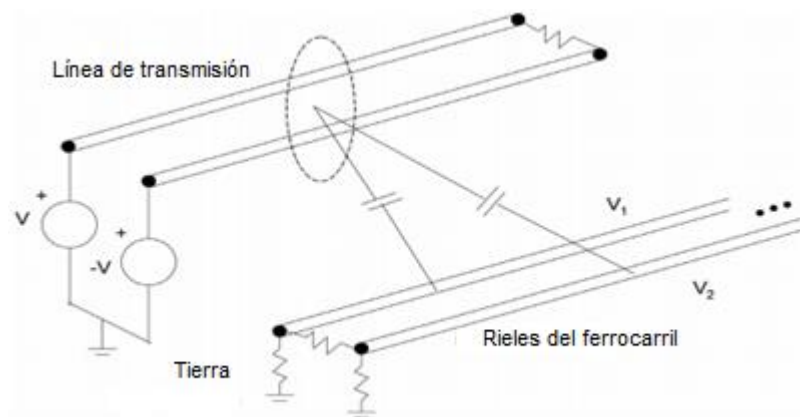
Los sistemas ferroviarios se dividen en dos grandes grupos:

- **Locomotoras diésel:** También llamado diésel-eléctrico, ya que el diésel por medio de un generador alimenta los motores eléctricos que impulsan las ruedas.
- **Locomotoras de tracción eléctrica:** Este tipo de locomotora utiliza electricidad de otra fuente, por lo general a través de un cable dispuesto en un tercer carril electrificado o un sistema de distribución, que se utiliza para alimentar los motores eléctricos que impulsan las ruedas.

Las interferencias aquí tratadas serán entre la línea de alta tensión y el equipo ferroviario para las locomotoras diésel.

**2.1.1 Perturbaciones a locomotoras diésel.** Los principales medios de acoplamiento a tener en cuenta para estas interferencias electromagnéticas entre la línea de alta tensión y los circuitos eléctricos, equipos eléctricos y/o electrónicos que involucran y asocian el sistema ferroviario son: el acoplamiento conductivo, capacitivo (campo eléctrico) e inductivo (campo magnético).

**Figura 4.** Inducción de tensiones por medio de campos eléctricos.

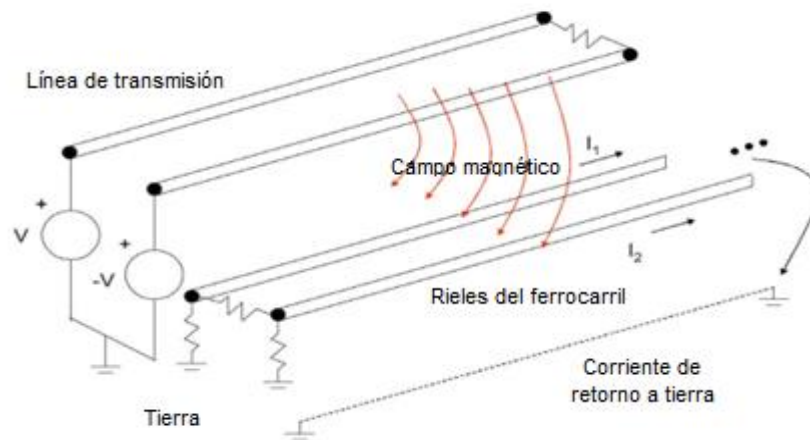


**Fuente:** [2].

La inducción del campo eléctrico es motivo de preocupación cada vez que hay objetos largos y/o grandes cerca de la línea de alta tensión que no estén bien conectados a tierra. Cuando la capacitancia entre la línea y la gran superficie de las vías férreas, es mayor que la inductancia entre las vías férreas y tierra, los campos eléctricos inducen tensiones como se ve en la figura 4, que suelen ser pequeñas [2]. Así mismo, las corrientes inducidas son del orden de los miliamperios, muy pequeñas como para interferir en el funcionamiento de los equipos ferroviarios, tanto en condiciones de funcionamiento normal como de falla, por tanto, son despreciadas.

Los campos magnéticos generados por la corriente eléctrica de la línea de alta tensión, se acoplan a los circuitos eléctricos que involucran las vías férreas como se muestra en la figura 5, induciendo corrientes del orden de los amperios a equipos ferroviarios, llevando al mal funcionamiento de señales y equipos de seguridad y control. Por tanto, el acople dominante es la inducción magnética en condiciones normales.

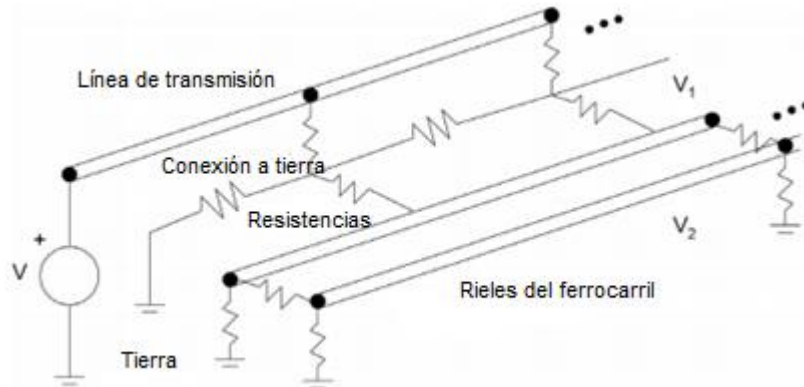
**Figura 5.** Inducción de corrientes por medio de campos magnéticos.



**Fuente:** [2].

En condiciones de falla, siempre se debe considerar que grandes corrientes circularán a tierra, por ello se tiene en cuenta el acople conductivo. Dicho acoplamiento “*depende fuertemente de la resistividad del suelo, que a su vez, depende de la humedad contenida en el suelo*” [2], haciendo que la impedancia entre la línea de alta tensión y el sistema ferroviario sea baja, por ello pueden fluir corrientes inyectadas a tierra por todo el sistema ferroviario y acoplar tensiones como se muestra en la figura 6. Estas tensiones inducidas pueden ser mayores al nivel de inmunidad de los equipos ferroviarios, produciendo así una mala operación de los mismos.

**Figura 6.** Tensiones acopladas por medio de la conducción.



**Fuente:** [2].

Por medio de los mecanismos de acoplamiento ya descritos, se puede concluir que la línea de alta tensión induce y acopla corrientes y tensiones a los equipos ferroviarios por medio de inducción de campos eléctricos y magnéticos y por conducción en condiciones de operación normal o de falla.

Los equipos ferroviarios como los sensores de movimiento, detectores de cruce entre otros, dispuestos para la señalización y operación de las vías férreas son muy sensibles y están diseñados para:

- Detectar la presencia de un tren dentro de un área definida por medio de un circuito compuesto por transmisores y receptores.
- Comunicar la información (como la ubicación de un tren) a lo largo de una línea del ferrocarril por medio de circuitos de vía codificados y comunicaciones por radio.
- Medir la posición o el movimiento de un tren con respecto a un punto fijo por medio de sensores de movimiento y predictores de cruce.

- Proporcionar información crítica para la seguridad de los trenes o los automóviles por medio de señales laterales, señales de cabina, puertas de paso, etc.
- Reconfigurar físicamente las vías del ferrocarril para construir una vía particular de viaje, por medio de mecanismos de conmutación e interruptores [2].

Las corrientes y tensiones inducidas por la línea de alta tensión, pueden perturbar las funciones anteriormente descritas del sistema de señalización de las vías férreas. En un caso común, una mala operación del sistema de señalización podría activar los equipos de señalización y/o detección del sistema ferroviario, haciendo que se detenga el tren.

Por otra parte, el equipo de señalización está diseñado para soportar las interferencias electromagnéticas teniendo como referencia “50 *Vrms en estado estacionario*” [2], que es una tensión peligrosa para el personal de mantenimiento, que rara vez son inducidos por la línea de alta tensión en estado estacionario.

En condiciones de falla de la línea de alta tensión, el sistema ferroviario está protegido con dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS), que están diseñados para soportar descargas atmosféricas, pero que en este caso protegerá al sistema ferroviario contra las fallas de la línea de alta tensión [2].

Otra condición importante es tener en cuenta los límites de corrientes y tensiones conducidas a los operarios de mantenimiento los cuales no deben exceder los 5 (mA) y los 50 (*Vrms*) [2].

## 2.2 SOLUCIONES DE MITIGACIÓN PARA EL SISTEMA FERROVIARIO

Se ha encontrado que, para mitigar las tensiones inducidas debido al campo eléctrico generado por la línea de alta tensión, se sugiere aumentar las distancias entre la línea y el sistema ferroviario, también instalar electrodos de puesta a tierra continuos.

Por otra parte, para disminuir las corrientes inducidas magnéticamente, se recomienda aumentar las distancias entre la línea de alta tensión y el sistema ferroviario, adicional a esto se puede minimizar el campo magnético, aumentando el número de conductores por fase (conductores en haz), reduciendo las corrientes que pueden fluir por la línea o instalando bucles activos<sup>6</sup> o pasivos<sup>7</sup> entre la línea y el suelo, pero si está relacionado con corrientes de falla se sugiere el uso de dispositivos limitadores de corriente. Por último, limitar en lo posible la exposición paralela del sistema ferroviario puede llegar a disminuir los efectos considerados anteriormente [2].

## 2.3 IEM CON EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

En los últimos años, los operadores de líneas de alta tensión han optado por construir las redes de distribución dentro de la zona de servidumbre de la línea, ya sea en las mismas estructuras o en estructuras separadas, esto por la viabilidad económica y el uso del espacio como se observa en la figura 7.

---

<sup>6</sup> Bucle activo, circuito cerrado alimentado por una fuente exterior el cual genera un campo que contrarresta al producido por la línea.

<sup>7</sup>Bucle pasivo, circuito cerrado sin fuente exterior, es alimentado por la corriente inducida de la línea la cual genera un campo que contrarresta al producido por la línea.

**Figura 7.** Línea de alta tensión y red de distribución compartiendo zona de servidumbre.



Uno de los puntos más importantes en la construcción del sistema de distribución, son las distancias adecuadas entre la línea de alta tensión y las redes de distribución, esto para evitar perturbaciones tanto en condiciones de operación normal como de falla de la línea. Al mismo tiempo, estas distancias garantizan espacios adecuados para el personal de mantenimiento tanto de la línea de alta tensión como de las redes de distribución.

Cuando estas distancias son inadecuadas la red de distribución es inducida por los campos electromagnéticos de la línea de alta tensión. Las corrientes inducidas pueden ser del orden de los amperios. De acuerdo a esto, si la red de distribución se encuentra operando cerca de sus valores eléctricos nominales y la línea de alta tensión le induce estas corrientes, las protecciones dejarían fuera de servicio la red de distribución. Por otro lado, los transformadores y la red estarían sobrecargados, así como otros equipos que conforman el sistema de distribución.

En las operaciones de mantenimiento del sistema de distribución, los problemas asociados se reflejan en la corriente y la tensión inducida en la red de distribución desenergizada, que puede poner en peligro al personal, cuando la línea de alta tensión se encuentra energizada u operando.

Una de las preocupaciones grandes para los operadores de red, es la posibilidad de que un conductor de la línea de alta tensión caiga y entre en contacto con las redes de distribución, provocando sobretensiones y sobrecorrientes, que pueden llegar a perjudicar en gran proporción las protecciones y equipos asociados a las redes de distribución.

De igual forma no todo es malo entre estos dos sistemas, ya que la línea de alta tensión protege las redes de distribución contra las descargas atmosféricas, al encontrarse por debajo de la misma. Dicha condición no es tan favorable algunas veces dado que podrían presentarse fluctuaciones en las redes de distribución. Otra situación beneficiosa de utilizar la red de distribución por debajo es que (debido a que su tensión es mucho más baja) los conductores de distribución tienden a reducir la intensidad de campo eléctrico que se perciben al nivel del suelo [2].

## **2.4 SOLUCIONES DE MITIGACIÓN PARA EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN**

Se ha encontrado que, para reducir las corrientes y tensiones inducidas a las redes de distribución por las líneas de alta tensión, es aconsejable realizar un estudio de las distancias efectivas que minimicen dichos campos, de igual forma el uso de un sistema de puesta a tierra continuo en cada punto de apoyo de la red de distribución.

Las fluctuaciones que se presentan cuando ocurren descargas atmosféricas en la línea de alta tensión, podrían mitigarse aumentando el nivel de aislamiento (BIL) de

la red de distribución, utilizando crucetas de fibra de vidrio y/o más dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS), esto cuando la misma estructura sostiene los dos sistemas.

Por último, es recomendable el uso de estructuras separadas y alejadas si es posible, para cada sistema, esto con el fin de evitar la interrupción del servicio de energía eléctrica de los dos sistemas en labores de mantenimiento y también para disminuir los efectos considerados anteriormente [2].

## **2.5 IEM CON SISTEMAS DE TUBERÍA**

Otro sistema que es albergado comúnmente dentro de la zona de servidumbre de la línea de alta tensión es el de la tubería, como se muestra en la figura 8. La línea de alta tensión induce tensiones y corrientes que pueden deteriorar el revestimiento<sup>8</sup>, la protección catódica<sup>9</sup> y otros equipos asociados al sistema de tubería e incluso provocar un riesgo mayor como la ignición del combustible que este transporte.

Así como en el sistema ferroviario expuesto anteriormente, para el sistema de tubería también se dan los mismos tres mecanismos de acoplamiento para las interferencias electromagnéticas provocadas por la línea de alta tensión, donde el acoplamiento capacitivo solo se tiene en cuenta si la tubería se encuentra en la superficie y sin conexión a tierra [2].

---

<sup>8</sup> El revestimiento es una capa que recubre una superficie metálica para protegerla.

<sup>9</sup> La protección catódica es una técnica para controlar la corrosión galvánica de una superficie de metal.

**Figura 8.** Línea de alta tensión y tubería compartiendo zona de servidumbre.



**Fuente:** Farwest corrosion control company. [en línea] <http://www.farwestcorrosion.com/zinc-ribbon-anodes-for-ac-mitigation-by-plattline.htm> [citado en agosto de 2016].

El acoplamiento capacitivo entre estos dos sistemas, es una inquietud que se tiene en cuenta cuando la tubería está dispuesta superficialmente y no conectada a tierra, ya que podría dar lugar a grandes tensiones y corrientes en la tubería, que aunque posea un revestimiento resistivo no será suficiente para garantizar la mitigación del campo inducido por la línea de alta tensión en la tubería. La inducción de campo eléctrico depende fuertemente del largo, la altura sobre la superficie y el radio de la tubería [2].

Por otra parte, la tubería no es uniforme a lo largo de la zona de servidumbre, ya que presenta diferentes tramos segmentados y conectados. Dichas interrupciones y la no conexión a tierra, provocan un cambio de impedancia en la tubería, que puede ser favorable para dar lugar a la inducción de grandes tensiones debido al acoplamiento inductivo entre la línea de alta tensión y la tubería, lo cual provoca riesgos para el personal de mantenimiento y el funcionamiento de la protección

catódica, el revestimiento, las comunicaciones, el sistema de monitoreo y la corrosión de la tubería.

Por último, el acoplamiento conductivo es un efecto inevitable al presentarse el contacto de la tubería metálica con la superficie de la tierra. De este modo en condiciones de falla de la línea de alta tensión, se presentan corrientes a tierra por medio de las estructuras de soporte y/o zapatas de la línea, que son conducidas a la tubería y equipos asociados.

Por medio de los mecanismos ya descritos, las corrientes y tensiones inducidas al sistema de tubería, puede afectar el funcionamiento y presentar daños tanto en estado estacionario como en presencia de fallas de la línea de alta tensión.

En estado estacionario, la línea de alta tensión puede inducir tensiones de hasta 50 V, que puede reducir la vida útil de la protección catódica que protege de la corrosión a la tubería, interferir las señales de datos dañando los equipos de comunicación y llegar a pasar los límites expuestos por la norma NACE RP0177-2000<sup>10</sup>, de las tensiones y corrientes de contacto que son de 15 Vrms y 10 mA, para una persona adulta con una resistencia aproximada de 1500  $\Omega$  [2].

De igual manera cuando se presentan fallas en la línea de alta tensión, se conducen grandes corrientes a tierra que inducen tensiones hasta de 500 V y pueden deteriorar el revestimiento, el aislamiento, la conexión a tierra, los pararrayos, la protección catódica e incluso perforar la tubería. De este modo al presentarse la condición de perforación en la tubería, se pueden ocasionar igniciones por el combustible que transporta [2].

---

<sup>10</sup> NACE RP0177-2000, Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems, Houston, Texas USA.

## 2.6 SOLUCIONES DE MITIGACIÓN PARA EL SISTEMAS DE TUBERÍA

Se ha encontrado que, para mitigar las corrientes producidas debido a las tensiones inducidas por los campos eléctricos, es recomendable alejar lo máximo posible la tubería de la línea de alta tensión, introducir múltiples puntos a tierra de baja impedancia a lo largo de la tubería, en lo posible lejos de las estructuras de soporte de la línea (para evitar posibles acoples conductivos) y el uso de mallas de alambre unidas al potencial de la tubería, para proporcionar zonas seguras de trabajo para el personal de mantenimiento.

Por otra parte, para reducir las tensiones inducidas por los campos magnéticos, es aconsejable segmentar y separar la tubería de la línea de alta tensión en lo posible para contrarrestar el acoplo inductivo. La segmentación de la tubería produce mayores costos en la protección catódica y puede llegar a presentar un problema tal como la presencia de grandes tensiones en la tubería, pero esta condición puede ser mitigada también con el uso de varios conductores cercanos a la tubería y conectados a tierra [2].

El acoplamiento conductivo está dado por la condición del contacto inminente entre la tubería y tierra, por tanto, es muy importante tener en cuenta que se debe aislar y separar en lo posible la torre y la tubería en el suelo. Para dar esta condición de aislamiento es recomendable el uso de varios conductores cercanos a la tubería y a las estructuras de soporte y conectarlos a tierra, como se mencionó anteriormente, lo cual reduce el acoplamiento conductivo garantizando una distribución efectiva de las tensiones en condiciones de falla [2].

Por último, la norma NACE RP0177-2000 realiza unas consideraciones globales al momento de la utilización de dispositivos para la protección y mitigación de todos los mecanismos de acoplamiento considerados anteriormente.

## 2.7 CASOS DE ESTUDIO

En esta sección se presentan algunos casos publicados por el IEEE y otros artículos en los cuales se discuten los problemas de compatibilidad electromagnética en los derechos de vía de la línea de transmisión de alta tensión.

**2.7.1 Sistemas ferroviarios.** En julio del año 1986, H. Robertson, M. Frazier, P. Thomas, J. Dunlap y T. Morgan publicaron el artículo IEEE "*Transmission Line, Railroad and Pipeline Common Corridor Study*", en el cual se realizó un estudio de la inducción magnética y electrostática (compatibilidad electromagnética) tanto en estado estacionario como en condiciones de falla, que produce la línea de alta tensión, debido a la tensión y corriente de la misma, que impactan sobre las condiciones de seguridad y el funcionamiento de instalaciones, equipos eléctricos o electrónicos asociados tanto al sistema de tubería como al sistema ferroviario, dentro de un corredor común en el sur de Arizona. El artículo trata de una línea de transmisión de 525 kV, analizando en 4 zonas con diferentes distancias de exposición de los sistemas asociados, las tensiones inducidas a instalaciones y/o equipos asociados al sistema ferroviario y tubería. En el estudio sugirieron que para reducir las tensiones inducidas en los equipos de señalización de las vías ferroviarias, era necesario alejar estos equipos a una distancia de 50 m de la línea, apantallar el conductor asociado al control del sistema ferroviario o cambiarlo por un sistema electrónico con un alto rango de inmunidad a las interferencias electromagnéticas producidas por la línea de alta tensión. Por otra parte, se sugirió para reducir las corrientes conducidas en condiciones de falla de la línea, la utilización de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS), tipo pesado y en paralelo, para el sistema ferroviario. De igual forma para la tubería se recomendó el uso de electrodos de puesta a tierra y piedra triturada [5].

**2.7.2 Sistemas de distribución.** En el año 2014, M. Shen, S. Shah y R. Eftekhari publicaron el artículo IEEE “Study of Electromagnetic Interference on Distribution Conductors from Parallel Transmission Line and Practical Mitigation Solutions”, donde se discute como la línea de transmisión de alta tensión induce tensiones y corrientes en el sistema de distribución, perturbando su operación normal y alterando sus magnitudes eléctricas. El artículo trata un caso concreto de una línea de transmisión de 110 kV y una red de distribución de 25 kV dispuestas verticalmente sobre la misma estructura, en el que se analizan tres diferentes escenarios de conexión del conductor neutro de la red de distribución con el sistema de puesta a tierra. En el estudio se muestra que la tensión inducida en los conductores de la red de distribución de 25 kV, pueden estar en el orden de los 60 V. Posteriormente demostraron que para reducir las tensiones inducidas tanto transversalmente como longitudinalmente, era necesario reducir la resistencia del sistema de puesta a tierra a  $10 \Omega$ , disponer horizontalmente la línea de transmisión de 110 kV, apantallar la red de distribución de 25 kV y/o aumentar la distancia de separación entre las fases de la línea y los conductores de la red de distribución, que puede no ser una práctica tan recomendable por cuestión de costos [6].

En el año 2015, Alexander Novitskiy, Irina Konotop y Dirk Westermann publicaron el artículo IEEE “*Power Quality Disturbances in Distribution Networks Caused by the Influence of Nearby Power Lines*”, donde se discute como las líneas de alta tensión pueden causar desequilibrio en la tensión de la red de distribución que se encuentre cerca, superando los valores estándares de calidad internacional. El artículo demuestra como la influencia y cercanía a una línea de 380 kV, puede causar interrupciones y daños en los dispositivos asociados a la red de 400 V [7].

**2.7.3 Sistemas de tuberías.** En la tesis, “*Análisis de la inducción electromagnética de líneas de transmisión sobre ductos subterráneos*”, realizada en el 2011 por: Pablo Alejandro Corona Martínez, Apolo Ramos Alfaro y Karla Salinas Reyes,

adscritos a la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional de México, se presenta un análisis de la inducción electromagnética de las líneas de transmisión sobre poliductos metálicos subterráneos, con el objetivo de obtener las tensiones inducidas en los ductos tanto en estado estable como en condiciones de falla de la línea de transmisión. En este trabajo se desarrolló una herramienta de simulación donde se analizó el caso de dos líneas de transmisión (230 kV y 400 kV), compartiendo la misma servidumbre de 100 km de largo con un oleoducto enterrado a 0,5 m, considerando cuatro casos de operación de la línea de transmisión (condición normal y falla trifásica, bifásica y monofásica). Observaron que se presenta un mayor riesgo en el caso de las fallas monofásicas afectando mayormente al ducto y su protección catódica. Obtuvieron que la línea de transmisión de 230 kV induce tensiones al oleoducto de 193 V en condición normal y de 373 V en condición de falla monofásica, de igual manera que la línea de transmisión de 400 kV induce tensiones al oleoducto de 361 V en condición normal y de 1049 V en condición de falla monofásica. Finalmente propusieron un método de mitigación que consistía en un conductor de cobre usado como blindaje, que fue simulado para encontrar las distancias óptimas de mayor minimización de las tensiones inducidas, llegando a obtener que la línea de transmisión de 230 kV induce tensiones al oleoducto de 100 V en condición normal y de 266 V en condición de falla monofásica, de igual manera que la línea de transmisión de 400 kV induce tensiones al oleoducto de 269 V en condición normal y de 895 V en condición de falla monofásica con la introducción de este blindaje [8].

En el artículo *“Mitigación de interferencias electromagnéticas AC, en configuraciones complejas de múltiples electroductos-gasoductos”*, publicado en agosto del 2014 por German Mancuso y Hernán Babino, se presentaron las acciones realizadas por la empresa Camuzi Gas, en dos gasoductos de Puerto Madryn, Argentina, con distintos tipos de revestimiento que son interferidos electromagnéticamente por la línea de transmisión Futaleufú- Aluar. El artículo trata el caso concreto de dos gasoductos paralelos separados 20 m, con longitud de 61

km y revestimientos A1 (asfáltico) en uno y G4 (tricapa) en el otro, que alimentan la ciudad de Puerto Madryn y una planta de Aluar respectivamente, compartiendo paralelamente el corredor común, una longitud de 46 km y alejados a una distancia de 50 m de la línea de transmisión de 330 kV, que está dispuesta horizontalmente en doble circuito. Se analizó que los niveles de protección catódica de los gasoductos debían ser rediseñados, puesto que con el tiempo y debido a varios factores se fueron degradando. De esta manera, se plantearon inicialmente la construcción de tres estaciones de mitigación AC, para mejorar la característica de la protección catódica, con configuraciones de cables desnudos paralelos de puesta a tierra, que permitieron reducir las tensiones inducidas máximas medidas de 170 V a 14,9 V, posteriormente a esto se construyó una cuarta estación de mitigación que redujo la tensión máxima medida a 7,6 V, teniendo presente que dichas tensiones medidas dependían fuertemente de la corriente transportada por la línea de transmisión [9].

### **3. CÁLCULO Y MITIGACIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO**

En este capítulo se presenta un método que permite determinar la densidad de flujo magnético generado por una línea de alta tensión, además se describe un método de blindaje que consiste en un circuito cerrado llamado comúnmente bucle pasivo el cual reduce la densidad de flujo magnético producido por la línea.

#### **3.1 CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO**

Para abordar de mejor manera las interferencias electromagnéticas producidas por la línea de alta tensión a otros sistemas, se estudia el campo magnético generado por la línea, ya que es el responsable de inducir corrientes del orden de los amperios en otros sistemas o equipos, por lo que es conveniente determinar su valor en la zona de servidumbre y en sus cercanías.

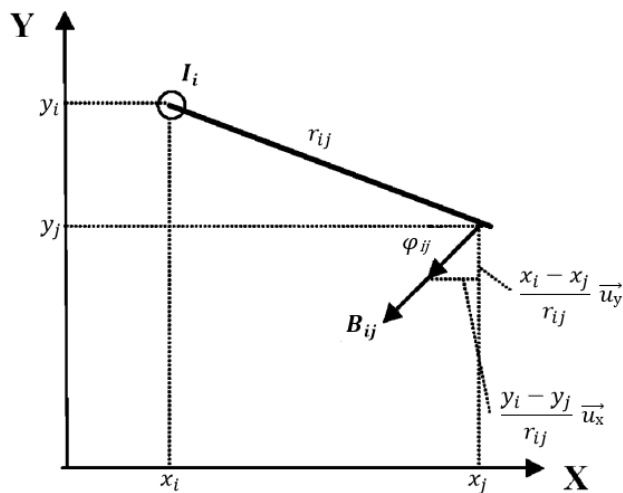
Para calcular el campo magnético generado por una línea de alta tensión se tienen en cuenta las siguientes suposiciones de acuerdo a, [2] y [10].

- Los conductores son rectos, paralelos e infinitamente largos.
- Se desprecia el efecto del campo magnético generado por la corriente inducida en los cables de guarda, ya que se encuentran conectados a tierra.
- Se desprecia el efecto de la corriente inducida entre las mismas fases de la línea de alta tensión.
- Puesto que el campo se calcula a distancias inferiores a 100 m, se puede despreciar el efecto de la tierra, es decir, la tierra se considera un mal conductor de campos magnéticos.
- Se desprecia el desnivel del terreno.

Conforme a estas suposiciones se puede determinar el campo magnético con una precisión suficiente usando un análisis simplificado de dos dimensiones.

Para efectos prácticos es más útil determinar la densidad de flujo magnético, la cual tiene su relación con el campo magnético por medio de la permeabilidad magnética. Con base en la ley de Biot-Savart se determina la densidad de flujo magnético en cualquier punto debajo de la línea de alta tensión. En la figura 9 se muestra un conductor de fase de una línea de transmisión en la posición  $(x_i, y_i)$  y un punto en la posición  $(x_j, y_j)$ . Para determinar la densidad de flujo magnético en el punto  $(x_j, y_j)$ , se utiliza la ecuación 3.1. Cabe aclarar que, para efectos de notación los fasores se representan con negrita.

**Figura 9.** Ilustración de la Ley de Ampère para un conductor de fase de la línea de transmisión respecto a un punto de medida.



Fuente: [11].

$$\vec{B}_{ij} = \mu_o \vec{H}_{ij} = \mu_o \left( \frac{I_i}{2\pi r_{ij}} \right) (\vec{dl} \times \vec{r}_{ij}) = \mu_o \left( \frac{I_i}{2\pi r_{ij}} \right) \vec{\varphi}_{ij} \quad 3.1$$

Donde:

$\vec{B}_{ij}$ : Densidad de flujo magnético.

$\mu_0$ : Permeabilidad magnética del aire  $4\pi * 10^{-7}$  H/m .

$\vec{H}_{ij}$ : Intensidad de campo magnético.

$I_i$ : Corriente del conductor .

$r_{ij}$ : Distancia desde  $I_i$  al punto de medida.

$\vec{dl}$ : Vector en la dirección de la corriente.

$\vec{r}_{ij}$ : Vector unitario de  $r_{ij}$ .

$\vec{\varphi}_{ij}$ : Producto vectorial entre  $\vec{dl}$  y  $\vec{r}_{ij}$  que indica la dirección de  $\vec{B}_{ij}$  .

En la ecuación 3.2 se muestra el resultado del producto vectorial entre  $\vec{dl}$  y  $\vec{r}_{ij}$  , el cual indica la dirección de la densidad de flujo magnético (figura 9).

$$\vec{\varphi}_{ij} = \left( -\frac{y_i - y_j}{r_{ij}} \right) \vec{u}_x + \left( \frac{x_i - x_j}{r_{ij}} \right) \vec{u}_y \quad 3.2$$

Como la corriente  $I_i$  es un fasor se puede expresar con la suma de sus componentes real e imaginaria:

$$I_i = I_{ir} + jI_{ii} \quad 3.3$$

Esto conlleva a que las componentes horizontal y vertical de la densidad de flujo magnético tengan parte real e imaginaria como se muestra continuación:

$$B_x = B_{xr} + jB_{xi} \quad 3.4$$

$$B_y = B_{yr} + jB_{yi} \quad 3.5$$

Si la línea de transmisión está compuesta por  $n$  conductores de fase con corrientes  $I_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), la densidad de flujo magnético total en un punto P, es la suma de las componentes horizontales y verticales de cada conductor de fase que conforma la línea (ecuación 3.6 y 3.7).

$$\mathbf{B}_{xt} = \sum_{i=1}^n B_{ixr} + j \sum_{i=1}^n B_{ixi} \quad 3.6$$

$$\mathbf{B}_{yt} = \sum_{i=1}^n B_{iyr} + j \sum_{i=1}^n B_{iyi} \quad 3.7$$

Por otra parte, para determinar la magnitud de la densidad de flujo magnético en el punto P, se calcula la magnitud del fador  $\mathbf{B}_{xt}$  y  $\mathbf{B}_{yt}$  como se muestra a continuación:

$$B_{xt} = \sqrt{B_{xr}^2 + B_{xi}^2} \quad 3.8$$

$$B_{yt} = \sqrt{B_{yr}^2 + B_{yi}^2} \quad 3.9$$

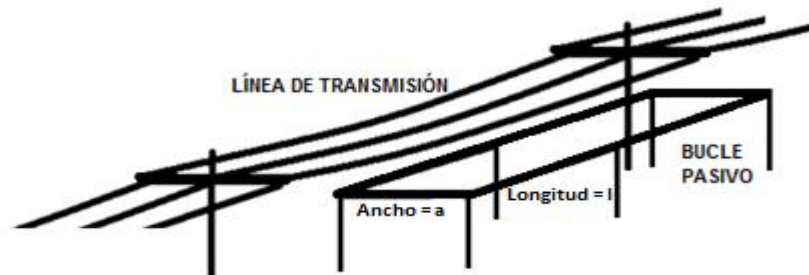
Luego se calcula la magnitud del vector de la densidad de flujo magnético el cual está dado por:

$$B_{Lt} = \sqrt{B_{xt}^2 + B_{yt}^2} \quad 3.10$$

### 3.2 MITIGACIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO

Una de las técnicas para reducir la densidad de flujo magnético generado por una línea de alta tensión consiste en instalar entre la línea y el suelo un bucle pasivo que funciona como blindaje, en el cual la corriente que circula es puramente inducida, es decir, no tiene fuente externa [14]. El bucle pasivo es un circuito cerrado que consiste en dos conductores paralelos a la línea y dos tramos que cierran el circuito como se muestra en la figura 10. En la figura 11 se muestra la implementación del bucle pasivo en una línea real.

**Figura 10.** Línea de transmisión y bucle.



**Fuente:** [10].

La corriente que circula por el bucle pasivo es generada por el campo magnético de la línea de alta tensión de acuerdo a la Ley de Faraday<sup>11</sup> (ecuación 3.11). Esta corriente inducida genera un campo magnético que contrarresta parcialmente el campo que la originó (Ley de Lenz)<sup>12</sup>. Este efecto se muestra en la figura 12.

---

<sup>11</sup>La ley de Faraday establece que la tensión inducida en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con la que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa la superficie del circuito.

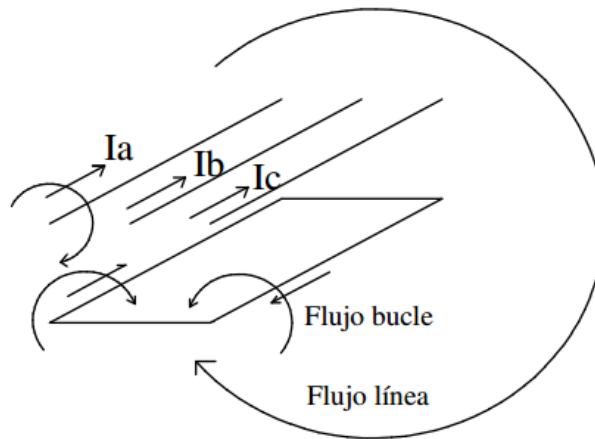
<sup>12</sup> La Ley de Lenz establece que la polaridad de la tensión inducida en un circuito cerrado es de un sentido tal que se opondrá a la variación del flujo magnético que lo produjo. Esta ley es una consecuencia del principio de conservación de la energía.

**Figura 11.** Implementación del bucle pasivo en una línea real.



**Fuente:** [2].

**Figura 12.** Campo magnético del bucle contrarrestando el de la línea.



**Fuente:** [10].

Para calcular los parámetros del bucle pasivo, la corriente inducida y la densidad de flujo magnético, se tienen en cuenta algunas consideraciones de acuerdo a [10] y [12]:

- La longitud de los dos conductores paralelos a la línea (longitud del bucle=  $\ell$ ) es mucho mayor que la longitud de los conductores perpendiculares (ancho del bucle= $a$ ). Conforme a que  $\ell \gg a$ , se puede despreciar el campo generado por los conductores perpendiculares.
- Se desprecia la corriente que pueda inducir el bucle sobre la línea.

Con estas consideraciones y conforme a la metodología propuesta por [10], [15], [16], se siguen los siguientes pasos:

- Calcular la tensión inducida en el bucle.
- Calcular la autoinductancia del bucle.
- Calcular la impedancia del bucle.
- Calcular la corriente inducida en el bucle.
- Calcular la densidad de flujo magnético generado por el bucle.

Las corrientes de fase de la línea de alta tensión generan un flujo magnético que atraviesa el bucle pasivo (figura 12), induciendo una tensión, ley de Faraday:

$$v = -N \frac{d\phi}{dt} \quad \mathbf{3.11}$$

Como la corriente que genera el flujo es senoidal y el bucle tiene una vuelta, la tensión inducida puede escribirse fasorialmente como:

$$\mathbf{V} = -j\omega\phi \quad \mathbf{3.12}$$

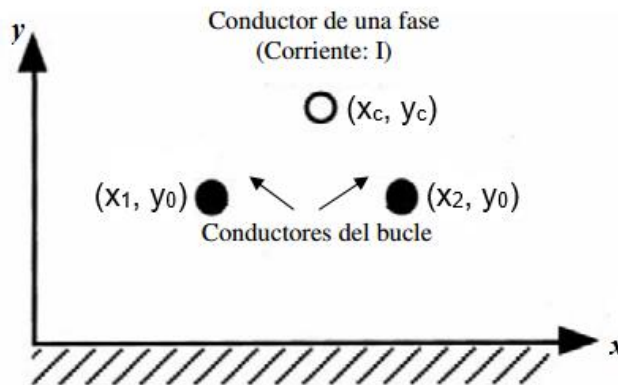
Donde  $V$  es la tensión inducida,  $\omega$  es la frecuencia angular y  $\phi$  es el flujo magnético perpendicular al plano del bucle. El flujo se expresa como:

$$\phi = \ell \int_{x_1}^{x_2} \mathbf{B}_n dx = \ell \int_{x_1}^{x_2} \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx \quad 3.13$$

Donde  $\mathbf{B}_n$  es el componente de densidad de flujo perpendicular al plano del bucle y  $\ell$  es la longitud del bucle. Si se consideran las coordenadas del conductor de fase y del conductor del bucle de la figura 13, el flujo magnético se expresa como:

$$\phi = \frac{-\mu_0 \ell I}{4\pi} \ln \frac{(x_2 - x_c)^2 + (y_0 - y_c)^2}{(x_1 - x_c)^2 + (y_0 - y_c)^2} \quad 3.14$$

**Figura 13.** Coordenadas del conductor de fase y bucle.



**Fuente:** [16].

Para una línea de alta tensión el flujo magnético total que atraviesa el plano del bucle es la suma de los flujos generados por cada una de las corrientes de fase. Por ejemplo, para la línea de la figura 12 el flujo total está dado por:

$$\phi_t = \phi_A + \phi_B + \phi_C \quad 3.15$$

Por último, la tensión inducida por la línea en el bucle se puede expresar como:

$$V = \omega \phi_t e^{j(\theta_{\phi_t} - \frac{\pi}{2})} = V \angle \theta_V \quad 3.16$$

Con base en la figura 13, la autoinductancia del bucle está dada por:

$$L = 4 \cdot 10^{-7} \ell \ln \left( \frac{|x_2 - x_1|}{r} \right) \quad 3.17$$

Donde  $\ell$  es la longitud del bucle,  $r$  es el radio del conductor del bucle y  $(x_2 - x_1)$  es el ancho del bucle. Si se considera la resistencia  $R$  del conductor del bucle, la impedancia se calcula como se muestra en la ecuación 3.18.

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}; \quad \theta_Z = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R} \right) \quad 3.18$$

La corriente inducida se puede expresar como:

$$I_{ind} = \frac{V}{Z} e^{j(\theta_V - \theta_Z)} = I_{ind} \angle \theta_{I_{ind}} \quad 3.19$$

Finalmente, para calcular la densidad de flujo magnético generado por el bucle pasivo, se utiliza la metodología descrita en el apartado 3.1. La densidad de flujo magnético total considerando el generado por la línea y por el bucle pasivo se muestra en la ecuación 3.20 y 3.21.

$$\mathbf{B}_{Tx} = B_{Lx} + B_{Bx} \quad 3.20$$

$$\mathbf{B}_{Ty} = B_{Ly} + B_{By} \quad 3.21$$

Donde  $\mathbf{B}_{Tx}$  y  $\mathbf{B}_{Ty}$  es la densidad de flujo magnético total de las componentes horizontal y vertical,  $B_L$  y  $B_B$  es la densidad de flujo magnético de la línea y del bucle pasivo. El campo magnético generado por el bucle no depende únicamente de la magnitud de la corriente inducida, sino también de su ubicación [13].

Si  $B_L$  es la densidad de flujo magnético de la línea y  $B_T$  es la de la línea más la del bucle pasivo, se puede definir la reducción porcentual de densidad de flujo magnético como:

$$R(\%) = 100 * \left| \frac{B_T}{B_L} \right| \quad 3.22$$

Donde  $R(\%)$  es el porcentaje al que se reduce la densidad de flujo magnético con la introducción del bucle pasivo, es decir, si por ejemplo  $B_T = 80 \mu\text{T}$  y  $B_L = 100 \mu\text{T}$  el porcentaje al que se reduciría la densidad de flujo magnético de la línea sería de 80%.

## 4. PRESENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE *PERMAG*

Con el fin de disponer de una herramienta computacional de software libre y fácil de manejar, se realizó una interfaz gráfica en el entorno Matlab llamada perfil de densidad de flujo magnético "*PERMAG*", que permite estimar de manera rápida y eficiente la densidad de flujo magnético generado por una línea de alta tensión en dos configuraciones: circuito horizontal y doble circuito vertical. Además, permite implementar un método de blindaje que reduce la densidad de flujo magnético producido por la línea.

Por otra parte, la introducción del blindaje (bucle pasivo) permite a *PERMAG* habilitar una opción para determinar un porcentaje de reducción que se calcula respecto a la densidad de flujo magnético sin blindaje, proporcionando al usuario una mejor interpretación de los resultados.

### 4.1 PRESENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA *PERMAG*

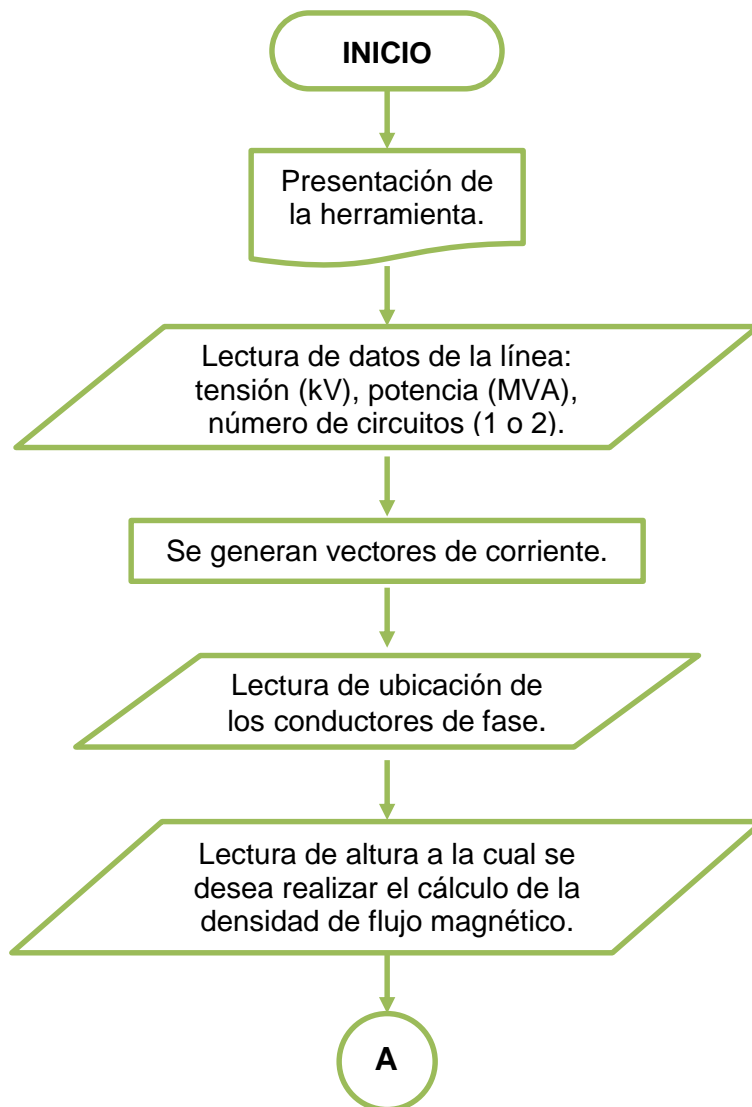
La metodología presentada en el capítulo tres, se utilizó para realizar una herramienta computacional llamada perfil de densidad de flujo magnético "*PERMAG*", donde se implementó un algoritmo que permite realizar el cálculo de la densidad de flujo magnético con y sin blindaje, por medio de una interfaz gráfica para una mejor interacción del usuario con la herramienta, en el ambiente de computación MATLAB.

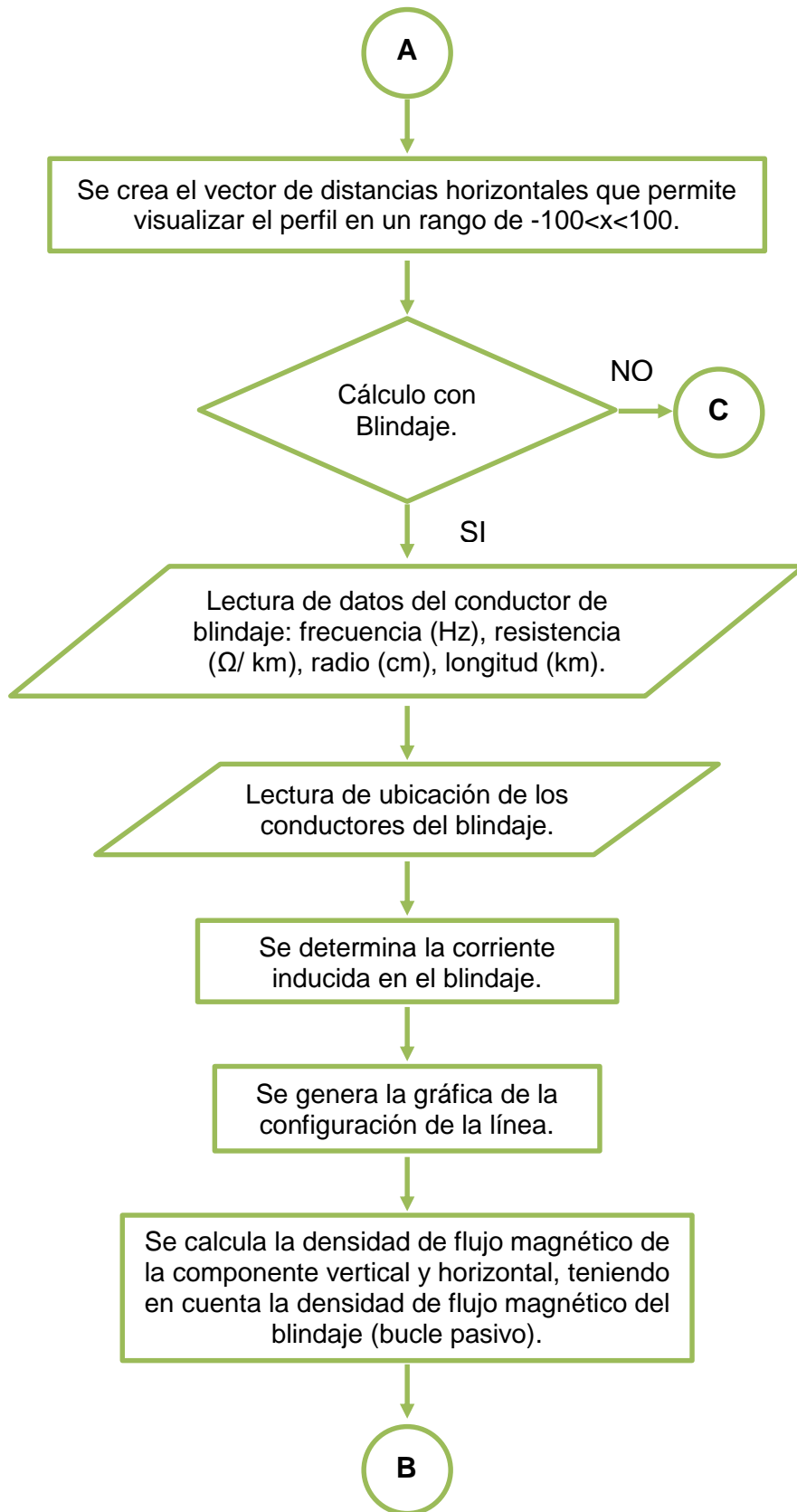
Vale la pena señalar que la herramienta desarrollada es eficaz y confiable para estimar la densidad de flujo magnético sin blindaje en los puntos por debajo de los conductores de la línea de alta tensión y con blindaje por debajo de los conductores

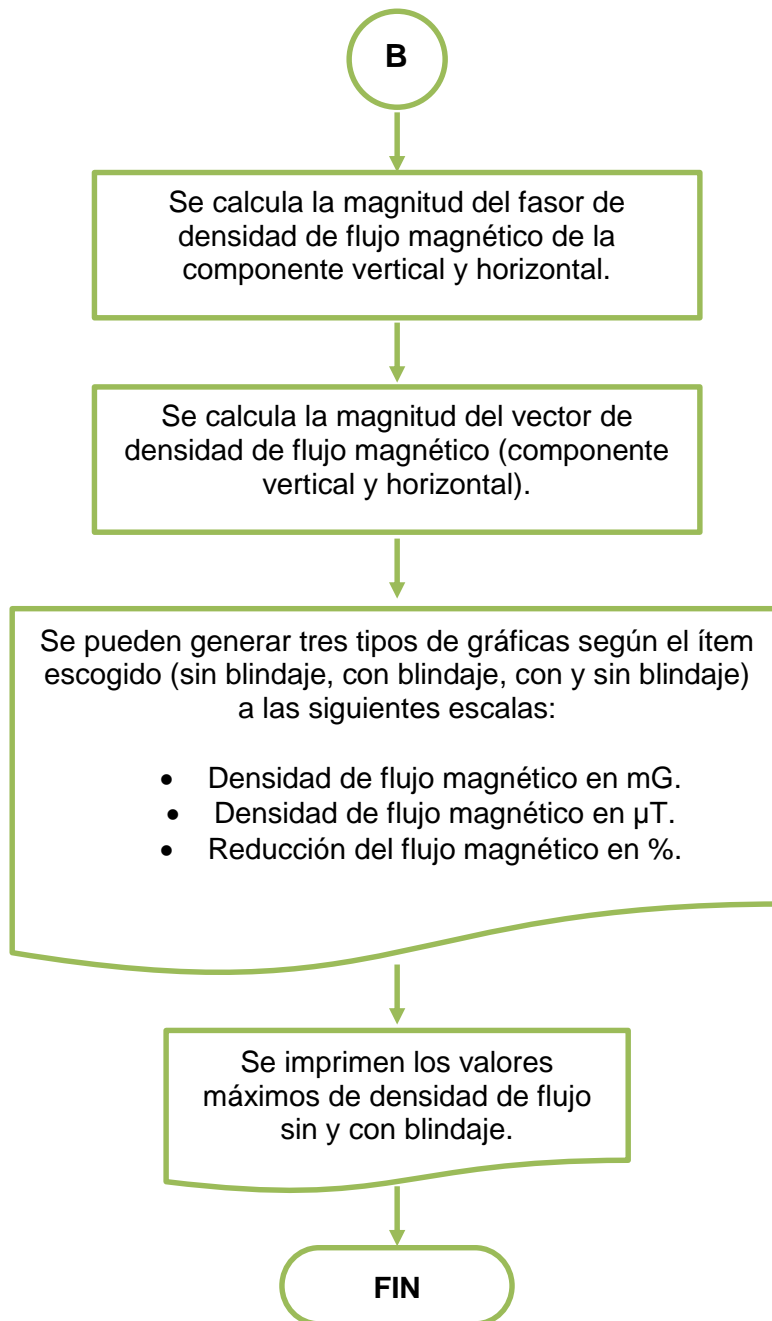
del bucle. De esta forma no es conveniente utilizar la herramienta para realizar la estimación de la densidad de flujo magnético para alturas superiores a los conductores según las consideraciones hechas anteriormente, ya que no podrían ser confiables.

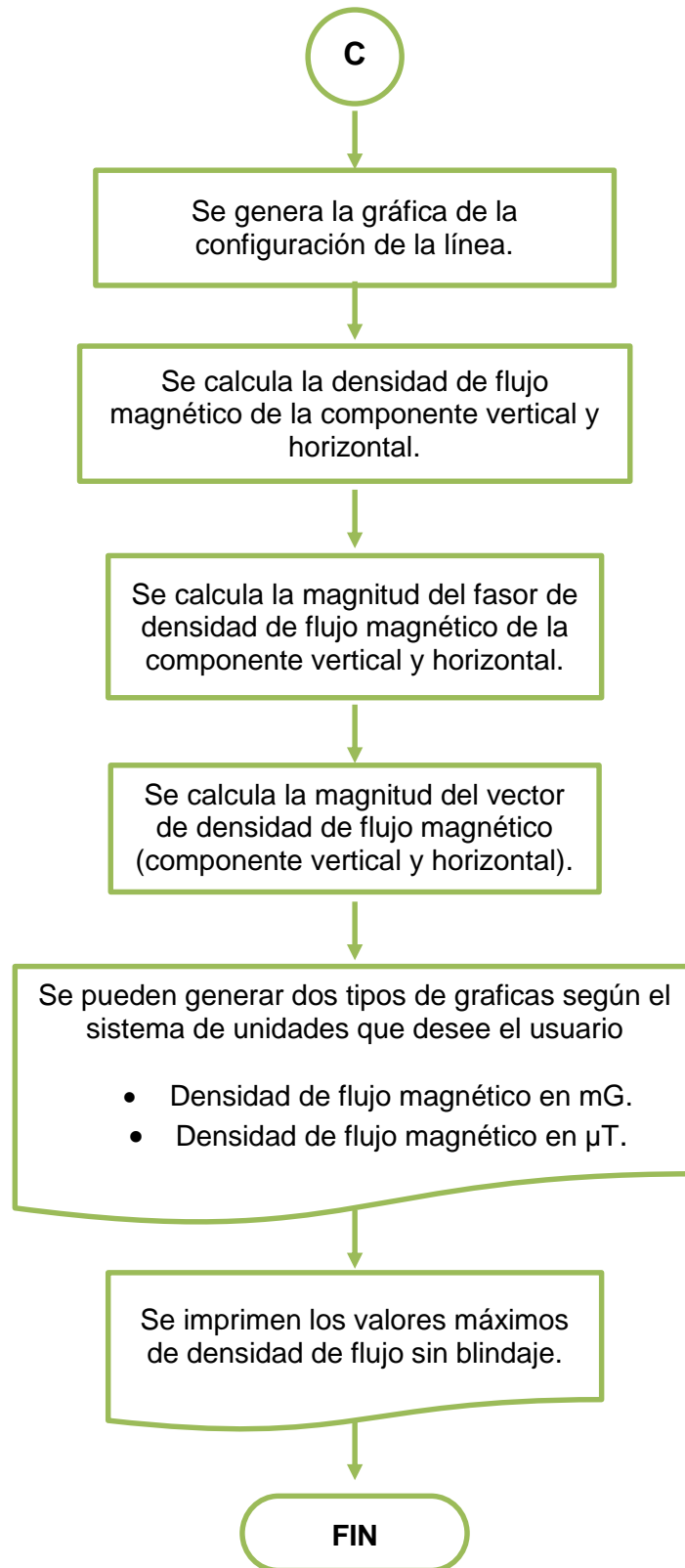
El respectivo manual de uso de la herramienta *PERMAG* se encuentra en el anexo A. El diagrama de flujo que muestra el procedimiento consecutivo de la herramienta se muestra a continuación.

#### 4.1.1 Diagrama de flujo







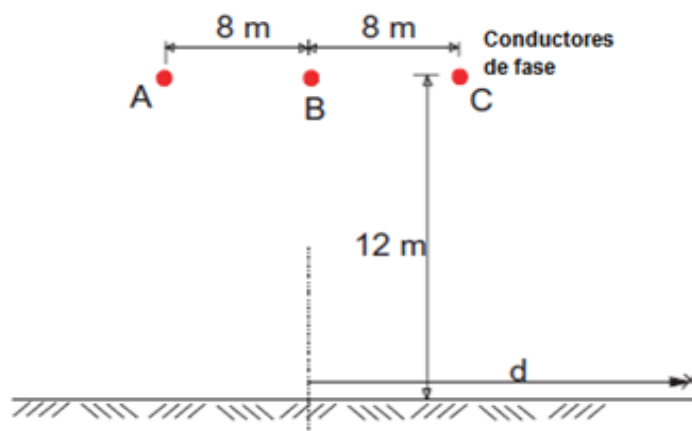


## 4.2 VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL *PERMAG*

Para la validación de los resultados que proporciona la herramienta *PERMAG*, los cuales son obtenidos al efectuar la simulación de una línea de alta tensión, se realizará una comparación de los perfiles laterales de densidad de flujo magnético con y sin blindaje, con los perfiles determinados a partir de la simulación de las líneas planteadas en cuatro casos presentados a continuación.

**4.2.1 Caso 1.** La primera validación se realizó con base a un caso simulado en el libro titulado “*EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition*”, donde utilizaron una herramienta computacional de licencia privada llamada reducción de campo magnético mediante la cancelación de bucles “*Applet EMF-11*” [2].

**Figura 14.** Línea de transmisión trifásica de 345 kV en configuración horizontal circuito sencillo.



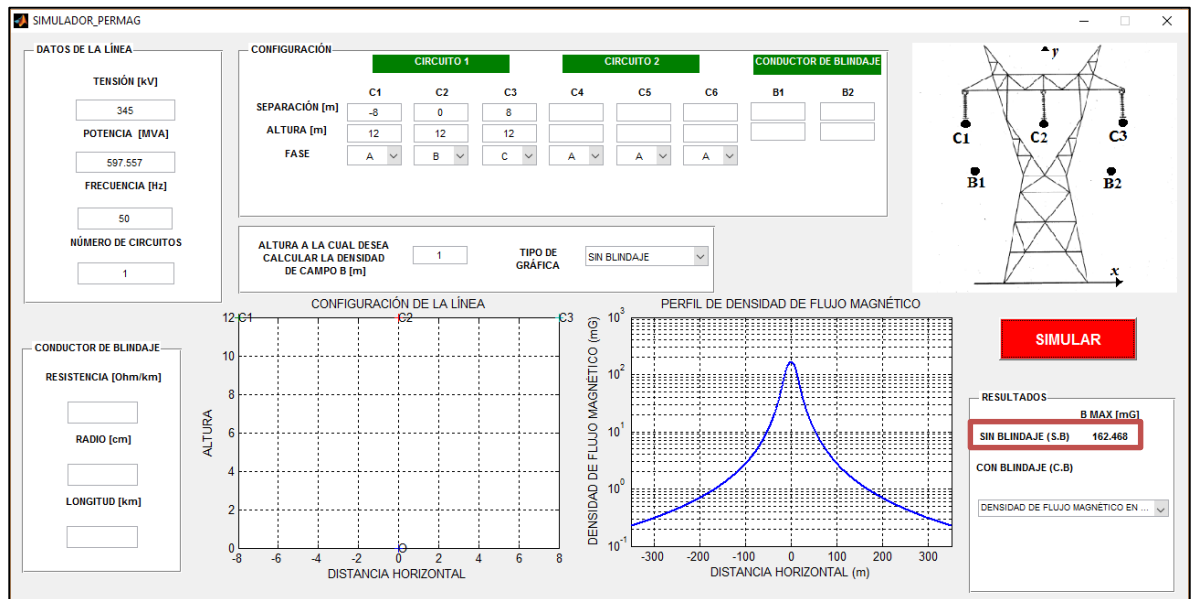
Fuente: [2].

La simulación de la densidad de flujo magnético del libro, fue realizada a 1 m de altura sobre el nivel del suelo, para una línea de transmisión trifásica de 345 kV, en configuración horizontal, con corrientes de línea equilibradas y simétricas de 1000 A, potencia aparente de 597,557 MVA y espaciamiento entre conductores de 8 m a una altura de 12 m sobre el nivel del suelo, como se puede observar en la figura 14.

Para la comparación del perfil de la densidad de flujo magnético simulada en EPRI de la línea anteriormente descrita, se realizó la simulación con *PERMAG* de la línea de transmisión trifásica de 345 kV, en configuración horizontal circuito sencillo.

En la figura 15, se muestra una captura de pantalla realizada durante la ejecución de *PERMAG*, donde se indican los datos de entrada y la configuración de la línea.

**Figura 15.** Datos de entrada de la línea de transmisión trifásica de 345 kV, en configuración horizontal circuito sencillo en *PERMAG*.

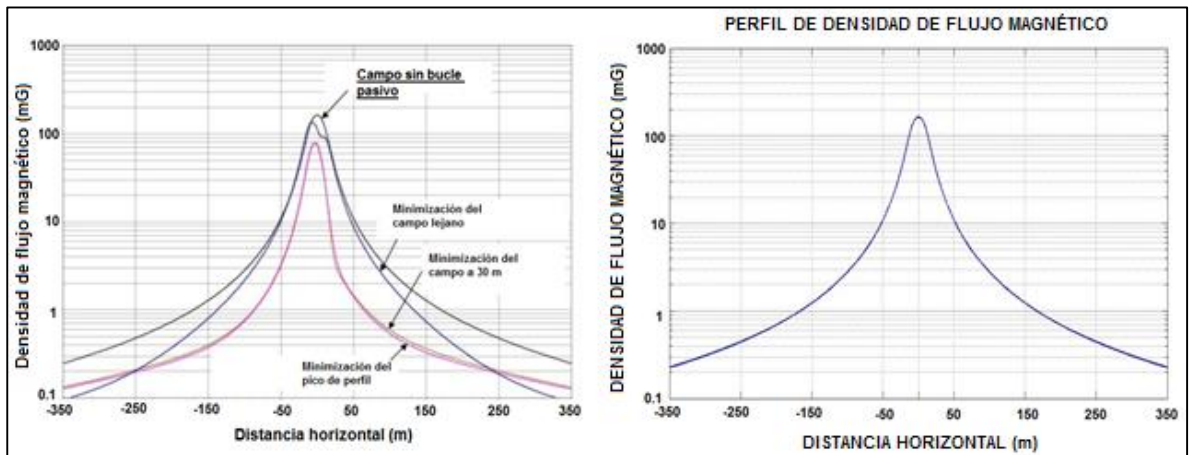


En la figura 16, se muestra la comparación de los resultados obtenidos en la simulación realizada en el libro EPRI y la simulación realizada en *PERMAG*. Donde se observará en la figura 16 (a), solamente el perfil de densidad de flujo magnético sin bucle pasivo, simulada en el libro EPRI.

**Figura 16.** Comparación de perfiles de densidad de flujo magnético obtenido a 1 m por encima del suelo, para la línea trifásica de 345 kV, en configuración horizontal.

a) Simulación EPRI.

b) Simulación *PERMAG*.



**Fuente:** [2] y autores.

En esta primera validación, se puede observar que el perfil de densidad de flujo magnético obtenido en la simulación *PERMAG* de la línea analizada, es semejante al perfil mostrado en el libro citado. De igual forma, en la referencia bibliográfica EPRI, se menciona que el máximo valor del perfil de campo magnético de la figura 16 (a), es de 162 mG. De esta manera, se puede validar de acuerdo al panel de resultados de *PERMAG* que se muestra en la figura 15, que el máximo valor de la densidad de flujo magnético determinado en la simulación es de 162,468 mG, por tanto, se evidencia que el error es bastante pequeño. Se deja claro que en la figura 16 (a), se estudian diferentes metodologías para la reducción de la densidad

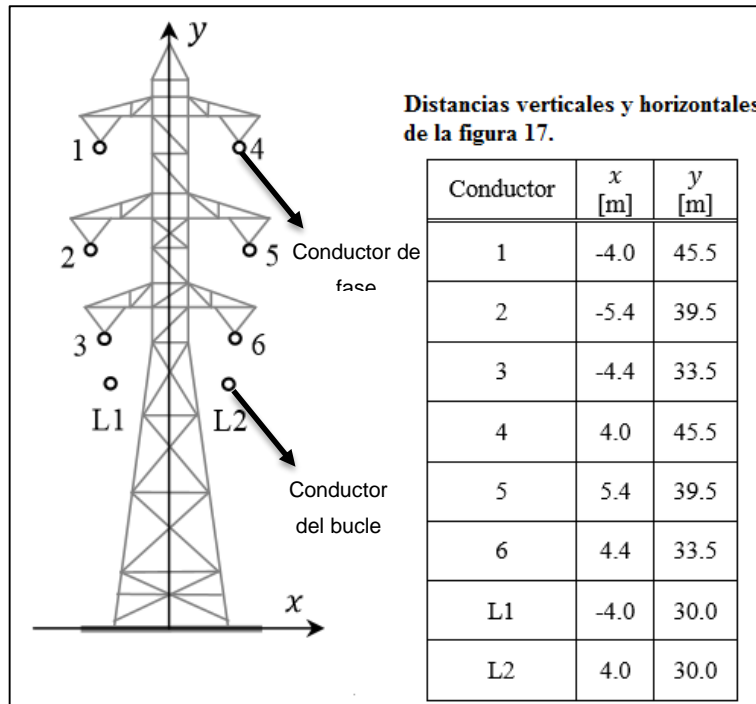
de flujo magnético, que no son acordes a la metodología estudiada en este trabajo de grado.

**4.2.2 Caso 2.** La segunda validación se realizó con base en un caso simulado en el artículo del IEEE, publicado por Mariano Giuseppe, Andrea Puccio, Guido Ala, Salvatore Ganci y Giovanni Filippone, titulado “*Mitigation of 50 Hz Magnetic Field Produced by an Overhead Transmission Line*”, donde se utilizó un procedimiento propuesto por los estándares italianos del Comité Electrotécnico italiano (CEI), para el cálculo de los campos magnéticos producidos por una línea de tendido eléctrico, evaluando el campo magnético generado por cada conductor por medio de la ley de Biot-Savart y el principio de superposición [17].

La simulación de la densidad de flujo magnético en el artículo, se realizó a nivel del suelo (0 m), para una línea de transmisión trifásica de 150 kV, en configuración vertical doble circuito, con corrientes de línea equilibradas y simétricas de 300 A, potencia aparente de 77,942 MVA y las coordenadas verticales y horizontales que se muestran en la figura 17. También se tuvo en cuenta la instalación de un bucle pasivo de 11,5 mm de diámetro y 350 m de largo dispuesto geométricamente junto con los conductores de fase.

Para la comparación de los perfiles de la densidad de flujo magnético con y sin blindaje, simulados en el artículo del IEEE de la línea anteriormente descrita, se realizó la simulación con *PERMAG* de la línea de transmisión trifásica de 150 kV, en configuración vertical doble circuito, con los circuitos en el siguiente orden: circuito 1 = A, B, C y circuito 2 = C, B, A.

**Figura 17.** Configuración geométrica de la línea de transmisión trifásica de 150 kV con bucle pasivo, en configuración vertical doble circuito.

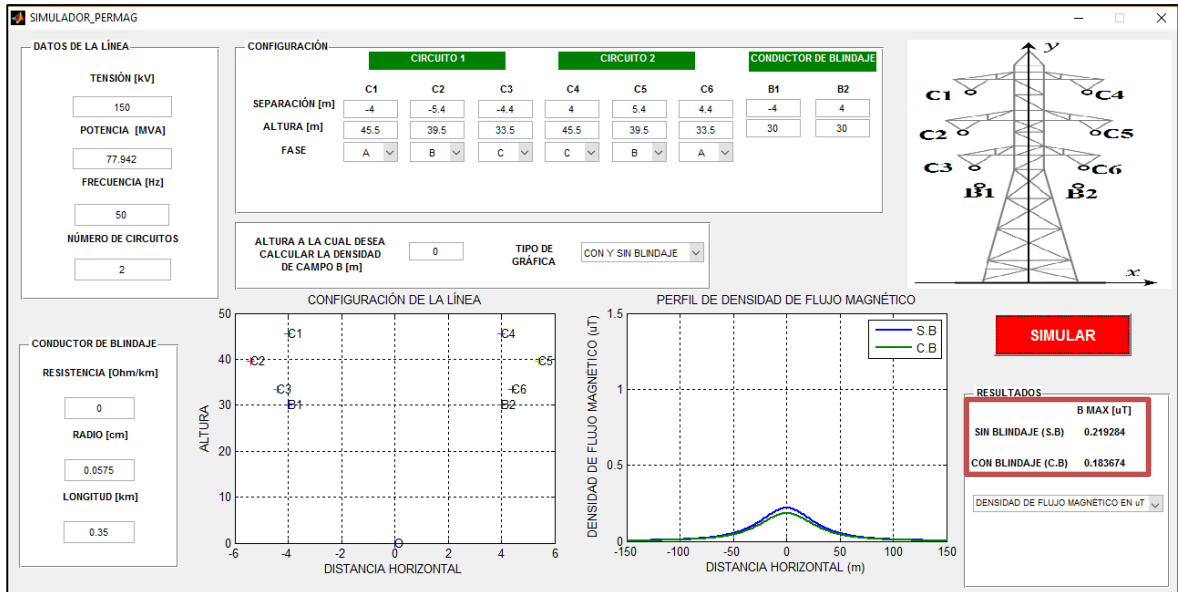


**Fuente:** [17].

En la figura 18, se muestra una captura de pantalla realizada durante la ejecución de *PERMAG*, donde se indican los datos de entrada y la configuración de la línea con los circuitos en el siguiente orden: circuito 1 (A, B, C) y circuito 2 (C, B, A).

En la figura 19, se muestra la comparación de los resultados obtenidos de la simulación realizada en el artículo del IEEE y la simulación realizada en *PERMAG*. Donde en la figura 19 (a) se observarán solo los perfiles de densidad de flujo magnético llamados circuito 2 = C, B, A y bucle pasivo.

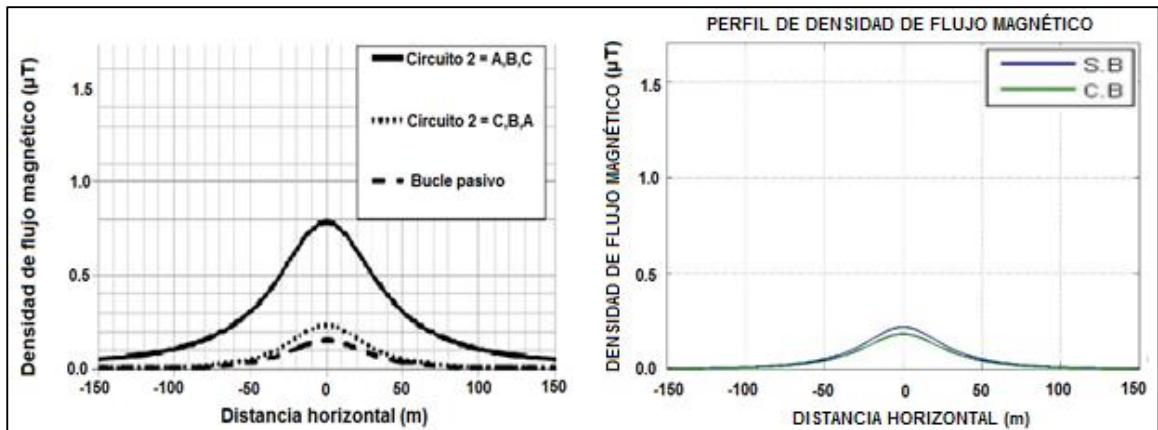
**Figura 18.** Datos de entrada de la línea de transmisión trifásica de 150 kV, en configuración vertical doble circuito, con los circuitos en el siguiente orden: circuito 1 (A, B, C) y circuito 2 (C, B, A), con y sin blindaje en *PERMAG*.



**Figura 19.** Comparación de perfiles de densidad de flujo magnético obtenido a nivel del suelo (0 m), para la línea de transmisión trifásica de 150 kV, en configuración vertical doble circuito, con el circuito 1 = A, B, C y circuito 2 = C, B, A.

a) Simulación Artículo del IEEE.

b) Simulación *PERMAG*.



Fuente: [17] y autores.

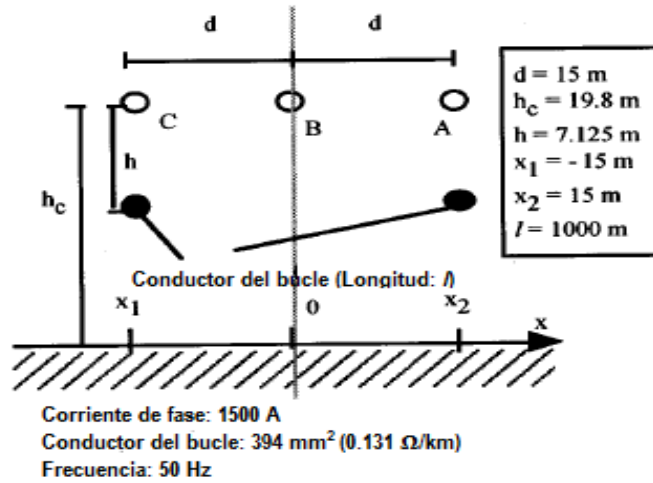
En esta segunda validación, se puede observar que los perfiles de densidad de flujo magnético obtenidos en la simulación *PERMAG* de la línea analizada, son semejantes a los perfiles mostrados en el artículo del IEEE. De esta manera se puede ver en la figura 19, que la densidad de flujo magnético a nivel del suelo de la línea de transmisión de 150 kV, tanto para la simulación realizada en el artículo como en la herramienta *PERMAG* es de aproximadamente 0,22  $\mu\text{T}$  sin blindaje y de aproximadamente 0,18  $\mu\text{T}$  con blindaje en el centro de la línea. Por otra parte, la densidad de flujo magnético en el centro de la línea se reduce a 81,81% de acuerdo con la ecuación 3.22. Cabe notar que cuando el circuito 2 tiene el orden A, B, C, aumenta la densidad de flujo generado por la línea y no induce tensiones al bucle.

**4.2.3 Caso 3 y Caso 4.** La tercera y cuarta validación se realizó sobre dos casos simulados en el artículo del IEEE, publicado por Kenichi Yamazaki, Tadashi Kawamoto y Hideo Fujinami, titulado “*Requirements for Power Line Magnetic Field Mitigation Using a Passive Loop Conductor*”, donde se utilizó la formulación teórica del concepto de dipolo para evaluar la corriente inducida al bucle pasivo, el cual fue validado y confirmado por medio de un arreglo de conductores experimentalmente modelado por los autores [16].

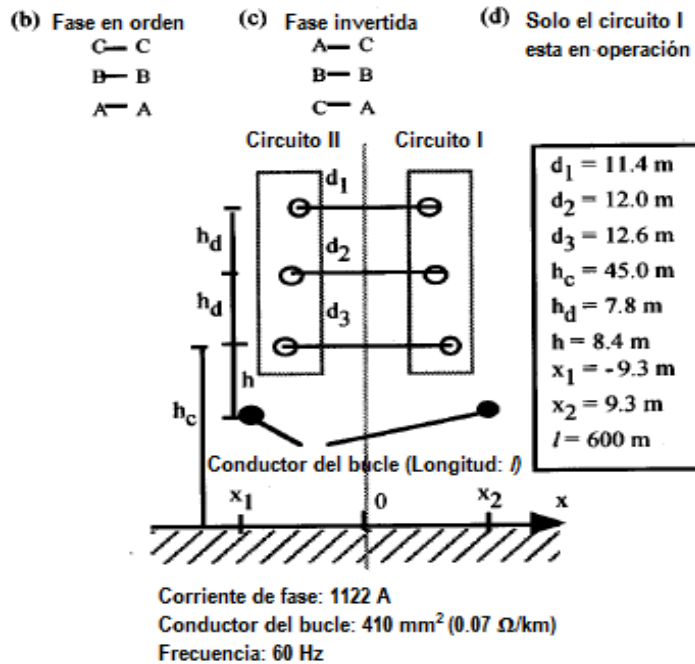
La simulación de la reducción de densidad de flujo magnético del artículo, se realizó a 1 m de altura sobre el nivel del suelo, para una línea de transmisión trifásica de 750 kV, en configuración horizontal, con una potencia aparente de 1948,557 MVA y para una línea de transmisión trifásica de 220 kV, en configuración vertical doble circuito, con una potencia aparente de 427,539 MVA. Sus respectivas características eléctricas y geométricas se muestran en la figura 20. En este caso el artículo considera la fase A a  $0^\circ$ , la fase B a  $120^\circ$  y la fase C a  $-120^\circ$ .

**Figura 20.** Configuración geométrica y características eléctricas de los conductores de las líneas de transmisión analizadas.

a) Línea de transmisión trifásica de 750 kV, en configuración horizontal.



b) Línea de transmisión trifásica de 220 kV, en configuración vertical doble circuito.

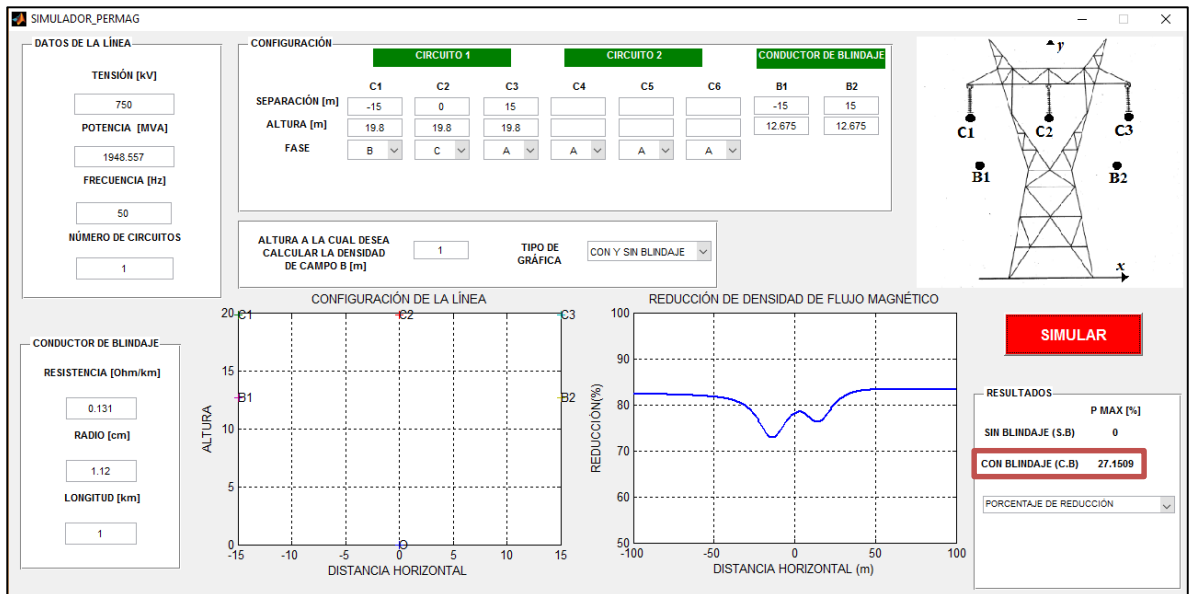


Fuente: [16].

Para la comparación de los perfiles de reducción de densidad de flujo magnético simulado en el artículo del IEEE de las líneas anteriormente descritas, se realizó la simulación con *PERMAG* de las líneas analizadas.

En la figura 21, se muestra una captura de pantalla realizada durante la ejecución de *PERMAG*, donde se indican los datos de entrada y la configuración de la línea de transmisión trifásica de 750 kV. Como la herramienta computacional asume por defecto que la fase A está a  $0^\circ$ , la fase B está a  $-120^\circ$  y la fase C está a  $120^\circ$  y el artículo asume que la fase A está a  $0^\circ$ , la fase B está a  $120^\circ$  y la fase C está a  $-120^\circ$ , se cambió la posición de las fases de (C, B, A) a (B, C, A).

**Figura 21.** Datos de entrada de la línea de transmisión trifásica de 750 kV, en configuración horizontal, con y sin blindaje, en *PERMAG*.

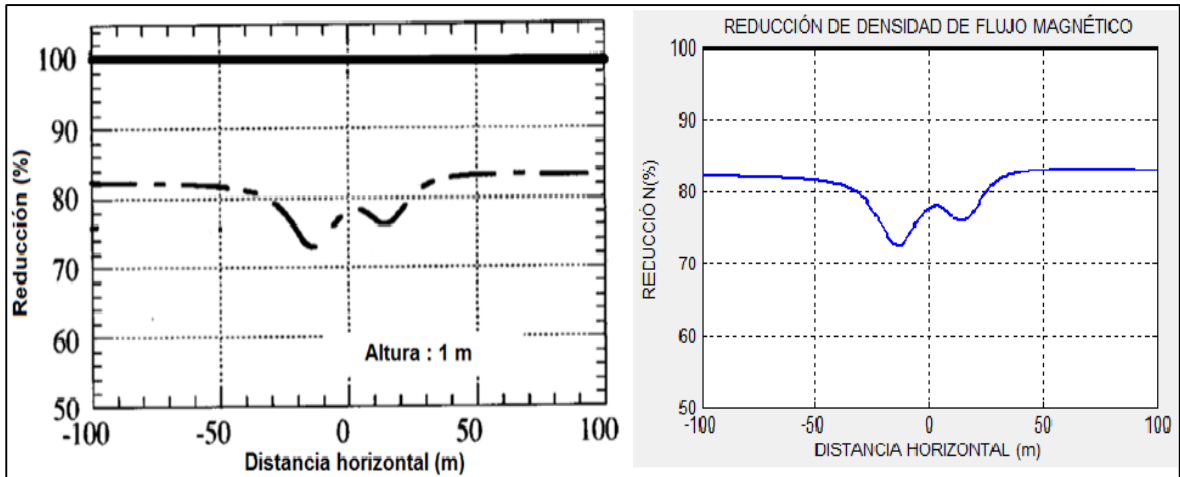


En la figura 22, se puede observar la comparación de los resultados obtenidos de la simulación realizada en el artículo del IEEE y la simulación realizada en *PERMAG*.

**Figura 22.** Comparación de los perfiles de reducción de densidad de flujo magnético con respecto al caso sin blindaje a 1 m de altura sobre el nivel del suelo, para la línea de transmisión trifásica de 750 kV, en configuración horizontal.

a) Simulación Artículo del IEEE.

b) Simulación *PERMAG*.

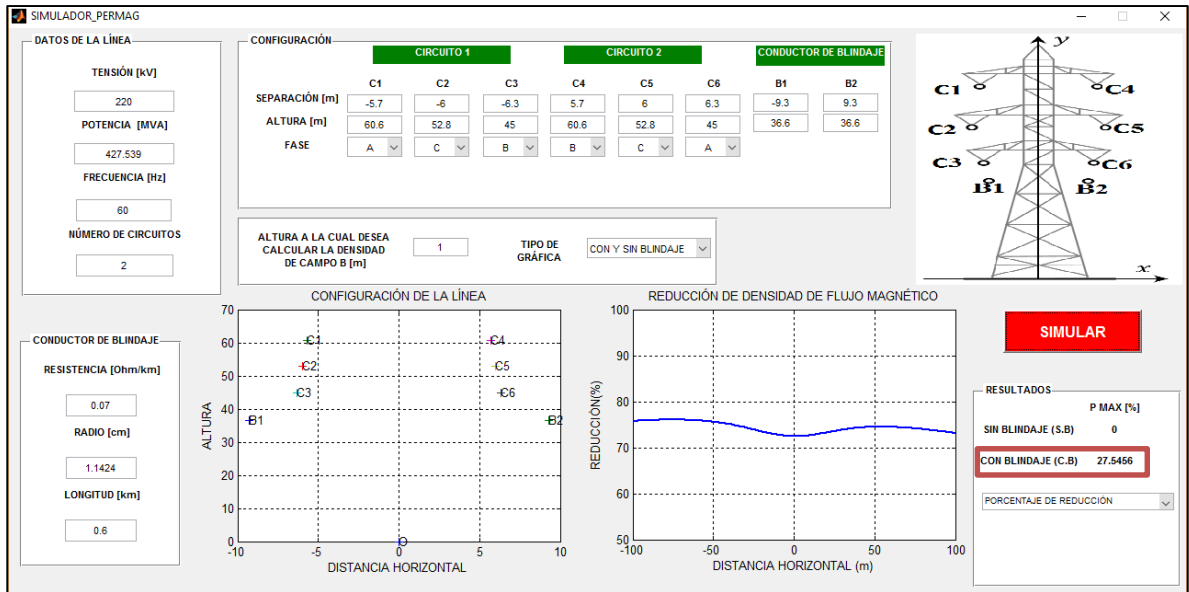


**Fuente:** [16] y autores.

En esta tercera validación, se puede observar que el perfil de reducción de densidad de flujo magnético obtenido en la simulación *PERMAG* de la línea analizada, es semejante al perfil mostrado en el artículo del IEEE. De igual forma en el panel de resultados de *PERMAG* mostrado en la figura 21, se observa que la densidad de flujo magnético de la línea se reduce 27,4665 % con la introducción del blindaje.

En la figura 23, se muestra una captura de pantalla realizada durante la ejecución de *PERMAG*, donde se indican los datos de entrada y la configuración de la línea de transmisión trifásica de 220 kV. Como la herramienta computacional asume por defecto que la fase A está a  $0^\circ$ , la fase B está a  $-120^\circ$  y la fase C está a  $120^\circ$  y el artículo asume que la fase A está a  $0^\circ$ , la fase B está a  $120^\circ$  y la fase C está a  $-120^\circ$ , se cambió la posición de las fases del circuito 1 a (A, C, B) y del circuito 2 a (B, C, A).

**Figura 23.** Datos de entrada de la línea de transmisión trifásica de 220 kV, en configuración vertical doble circuito, con los circuitos en el siguiente orden: circuito 1 (A, C, B) y circuito 2 (B, C, A), con y sin blindaje, en *PERMAG*.



**Fuente:** [16] y autores.

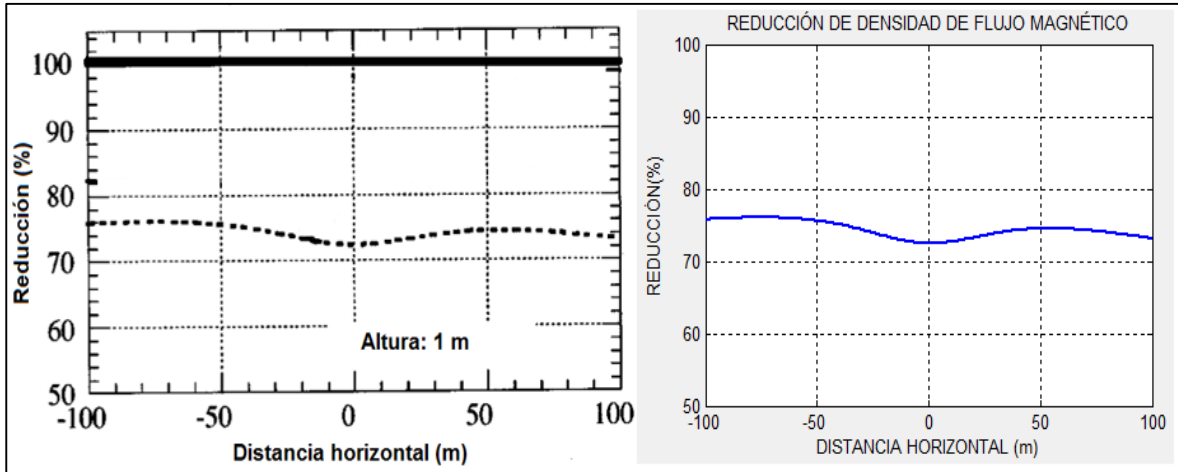
En la figura 24, se puede observar la comparación de los resultados obtenidos de la simulación realizada en el artículo del IEEE y la simulación realizada en *PERMAG*.

En esta cuarta validación, se puede observar que el perfil de reducción de densidad de flujo magnético obtenido en la simulación *PERMAG* de la línea analizada, es semejante al perfil mostrado en el artículo del IEEE. De igual forma en el panel de resultados de *PERMAG* mostrado en la figura 23, se observa que la densidad de flujo magnético de la línea se reduce un 27,5456 % con la introducción del blindaje.

**Figura 24.** Comparación de los perfiles de reducción de densidad de flujo magnético con respecto al caso sin blindaje a 1 m de altura sobre el nivel del suelo, para la línea de transmisión trifásica de 220 kV, en configuración vertical doble circuito, con los circuitos en el siguiente orden: circuito 1 ( A, C, B) y circuito 2 (B, C, A).

a) Simulación Artículo del IEEE.

b) Simulación *PERMAG*.



**Fuente:** [16] y autores.

Por último, cabe destacar que la herramienta computacional *PERMAG* es confiable, eficaz y sencillo de manejar para realizar la estimación del perfil de densidad de flujo magnético de una línea de alta tensión. De igual manera le brinda al usuario la opción de implementar un blindaje que reduce la densidad de flujo magnético producido por la línea, además, compara los perfiles de la densidad de flujo magnético con y sin blindaje, también permite visualizar un perfil de reducción de densidad de flujo magnético para tener una mejor interpretación de los resultados. Por otra parte, el usuario puede variar la posición del blindaje para encontrar la ubicación más óptima que permita la mayor reducción de la densidad de flujo magnético de una línea de alta tensión.

## 5. CONCLUSIONES

- La instalación de otros sistemas tales como: vías de ferrocarril, redes de distribución y tuberías, en la zona de servidumbre de la línea de alta tensión, puede causar problemas de compatibilidad electromagnética (interferencia electromagnética), ya que los campos electromagnéticos generados por la línea, pueden inducir corrientes del orden de los amperios en los equipos asociados al sistema, por lo que es importante estudiar con anterioridad los campos a los que estarán expuestos los sistemas, esto con el fin de garantizar su perfecto funcionamiento u operatividad.
- Mediante el uso del software MATLAB, se desarrolló la herramienta computacional *PERMAG*, que realiza el cálculo del perfil de densidad de flujo magnético de una línea de alta tensión en dos configuraciones posibles: horizontal sencilla y doble circuito vertical, además permite implementar un método de blindaje que reduce la densidad de flujo magnético producido por la línea.
- Al comparar los resultados obtenidos por la herramienta *PERMAG* con los casos de validación, se observó una buena aproximación del cálculo, por lo que se demuestra que es una herramienta útil y efectiva para determinar los valores de densidad de flujo magnético en la zona de servidumbre de una línea de alta tensión. De acuerdo con esto, *PERMAG* puede revisar los límites reglamentarios de densidad de flujo magnético de una línea de transmisión que está construida o que se planea construir, ya que en Colombia, el RETIE, exige valores límite de exposición a intensidades de densidad de flujo magnético de 1000  $\mu\text{T}$  y 200  $\mu\text{T}$  para exposiciones de tipo

ocupacional y poblacional (público en general) respectivamente, ambas contempladas para una exposición continua de 8 horas.

- Se pudo verificar que el método de blindaje de bucles pasivos reduce la densidad de flujo magnético que genera la línea de alta tensión. De acuerdo a los ejemplos de los casos validados se evidenció que en configuración horizontal se puede tener una reducción de 28% y que en la configuración doble circuito vertical, cuando el circuito 1 está en el orden (A, B, C) y el circuito 2 está en el orden (C, B, A) se puede tener una reducción de hasta 28 %.
- En la validación de *PERMAG*, se observó que cuando en la línea de alta tensión de doble circuito vertical no se invierte el circuito 2, es decir, los circuitos 1 y 2 están en el orden (A, B, C), la densidad de flujo magnético se aumenta de 2 a 4 veces con respecto al valor máximo de la densidad de flujo magnético con el circuito 2 invertido (C, B, A). Además, cuando el circuito 2 no se invierte, el método de blindaje es ineficiente, ya que la línea no induce corriente en el bucle pasivo, por lo que es aconsejable invertir el circuito 2.

## REFERENCIAS

- [1] Balcells J., Daura F., Esparza R., Pallas R., Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos, Parte I. Primera edición, 1991.
- [2] EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition, Palo Alto, California – USA, 2005.
- [3] RETIE, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Ministerio de Minas y Energía, Resolución No. 90708 agosto de 2013.
- [4] NTC-IEC 61000-1-1 Compatibilidad electromagnética, ICONTEC, 2000.
- [5] Robertson H., Frazier M., Thomas P., Dunlap J. y Morgan T., *“Transmission line, railroad and pipeline common corridor study”*, IEEE, 1986.
- [6] Shen M., Shah S. y Eftekhari R., *“Study of electromagnetic interference on distribution conductors from parallel transmission line and practical mitigation solutions”*, IEEE, 2014.
- [7] Novitskiy A., Konotop I. y Westermann D., *“Power quality disturbances in distribution networks caused by the influence of nearby power lines”*, IEEE, 2015.
- [8] Corona P., Ramos A., Salinas K., *“Análisis de la inducción electromagnética de líneas de transmisión sobre ductos subterráneos”*, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, 2011, México.
- [9] Mancuso G., Babino H., *“Mitigación de interferencias electromagnéticas AC, en configuraciones complejas de múltiples electroductos-gasoductos”*, Camuzi Gas, 2014, Argentina.

- [10] Cadavid D., Ramírez D., Lopera F., Correa A., “*Mitigación de campo magnético de líneas de transmisión utilizando bucles pasivos*”, Revista EIA, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Julio 2010, Medellín, Colombia.
- [11] Memari A., “*Optimal calculation of impedance of an auxiliary loop to mitigate magnetic field of a transmission line*”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, No. 2, pp. 844-850, 2005.
- [12] Cruz P., “*Análisis, cálculo y técnicas de mitigación de campos magnéticos creados por líneas eléctricas de alta tensión*”. Tesis doctoral. Escuela de Ingenieros de Sevilla (Sevilla, España). 2000.
- [13] Cruz, P., Izquierdo C., “*Optimum passive shields for mitigation of power lines magnetic field*”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.18, No. 14, pp. 1357-1362, 2003.
- [14] Petterson P., “*Principles in transmission line magnetic field reduction*” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, no. 3, pp. 1587–1593, 1996.
- [15] Memari A., Janischewskyj W., “*Mitigation of magnetic field near power lines*”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, No. 3, pp. 1577-1586, 1996.
- [16] Yamazaki K., Kawamoto T., Fujinami H., “*Requirements for power line magnetic field mitigation using a passive loop conductor*”. IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 15, No. 2, pp. 646-651, 2000.
- [17] Ippolito M., Puccio A., Ala G., Ganci S. y Filippone G., “*Mitigation of 50 Hz Magnetic Field Produced by an Overhead Transmission Line*”, IEEE, 2015.

## BIBLIOGRAFÍA

CADAVID D., RAMÍREZ D., LOPERA F., CORREA A., Mitigación de campo magnético de líneas de transmisión utilizando bucles pasivos, Medellín: Revista EIA, Escuela de Ingeniería de Antioquia, 2010.

CRUZ P., Análisis, cálculo y técnicas de mitigación de campos magnéticos creados por líneas eléctricas de alta tensión, Sevilla: Escuela de Ingenieros de Sevilla, 2000.

CRUZ, P., IZQUIERDO C., Optimum passive shields for mitigation of power lines magnetic field. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.18, No. 14, pp. 1357-1362, 2003.

EPRI AC TRANSMISSION LINE REFERENCE BOOK—200 KV AND ABOVE, Third Edition, Palo Alto, California, 2005.

IPPOLITO M., PUCCIO A., ALA G., GANCI S. Y FILIPPONE G., Mitigation of 50 Hz Magnetic Field Produced by an Overhead Transmission Line, IEEE, 2015.

MEMARI A., Optimal calculation of impedance of an auxiliary loop to mitigate magnetic field of a transmission line. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, No. 2, pp. 844-850, 2005.

MEMARI A., JANISCHEWSKYJ W., Mitigation of magnetic field near power lines. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, No. 3, pp. 1577-1586, 1996.

PETTERSON P., Principles in transmission line magnetic field reduction. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, no. 3, pp. 1587–1593, 1996.

RETIE, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Ministerio de Minas y Energía, Resolución No. 90708 agosto de 2013.

YAMAZAKI K., KAWAMOTO T., FUJINAMI H., Requirements for power line magnetic field mitigation using a passive loop conductor. IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 15, No. 2, pp. 646-651, 2000.

## ANEXOS

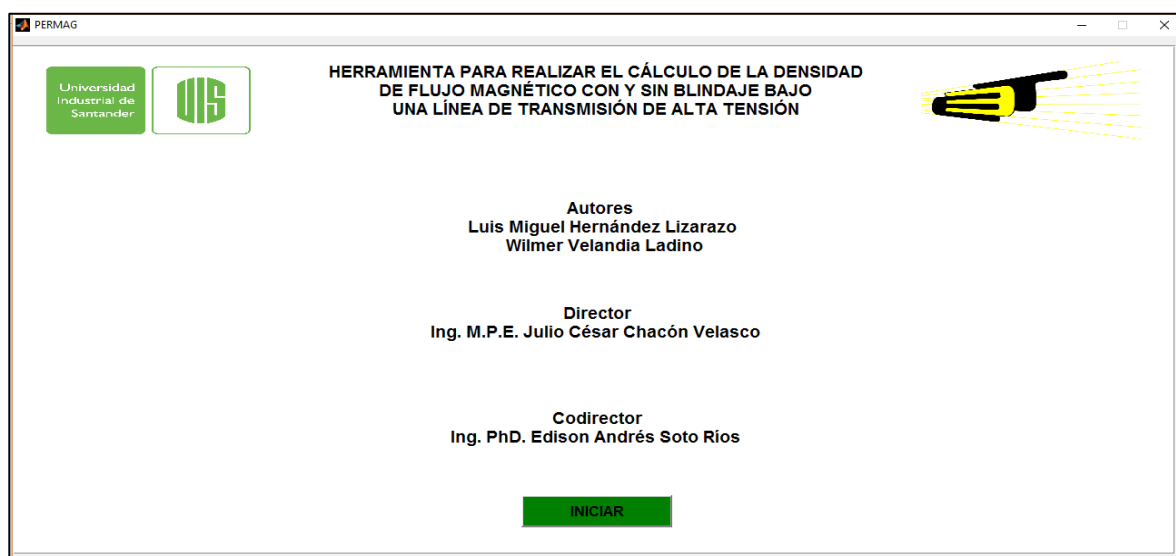
### ANEXO A. MANUAL DE USO DE LA HERRAMIENTA *PERMAG*

La herramienta *PERMAG* realiza el cálculo de la densidad de flujo magnético que produce una línea de alta tensión con o sin bucle pasivo en la zona de servidumbre y sus cercanías, mostrando una gráfica de perfil transversal a la zona de servidumbre de la línea. También puede realizar un perfil de porcentaje de reducción de densidad de flujo magnético, cuando en el menú desplegable (tipo de grafica) se elige la opción con y sin blindaje.

#### PRESENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA

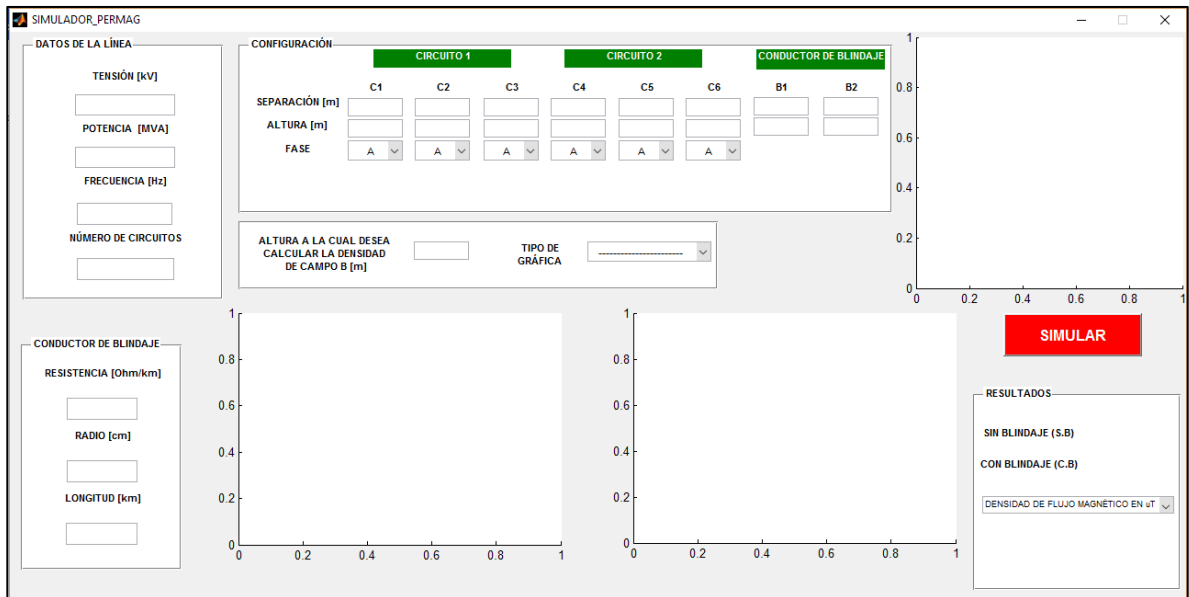
Cuando se ejecuta *PERMAG* se abre la ventana de presentación de la herramienta en la que se encuentra su título, los nombres de sus autores, director y codirector del proyecto (figura A1).

**Figura A1.** Presentación de *PERMAG*.



En la interfaz gráfica de presentación también se encuentra un botón llamado INICIAR, el cual abre la siguiente ventana, que corresponde a la interfaz gráfica de *PERMAG* (figura A2).

**Figura A2.** Interfaz gráfica de *PERMAG*.



## ENTRADA DE DATOS

Para que *PERMAG* funcione de manera correcta, la entrada de datos debe ser completa. La herramienta solo acepta valores numéricos.

### ***Panel datos de la línea***

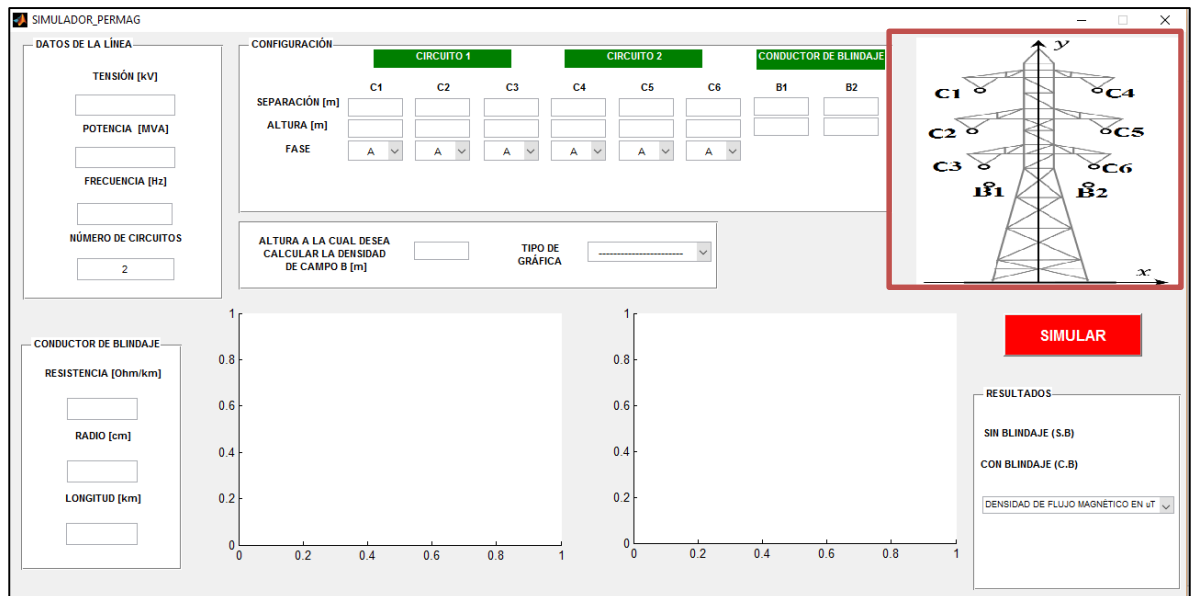
En este panel de la interfaz se digitan los datos básicos de la línea.

**Tensión:** Recuadro para digitar la tensión de línea de la línea de alta tensión, en kilovoltios (kV).

**Potencia:** Recuadro para digitar la potencia que transporta la línea de alta tensión, en megavoltiamperio (MVA).

**Número de circuitos:** Recuadro para digitar el número de circuitos de la línea de alta tensión, 1 para un circuito en disposición horizontal y 2 para dos circuitos en disposición vertical. En la parte superior derecha de la interfaz se muestra una figura con el tipo de configuración cuando se digita 1 o 2. En la figura A3 se muestra una captura de pantalla para un ejemplo de 2 circuitos.

**Figura A3.** Ejemplo cuando se digita 2 en número de circuitos.



### ***Panel Conductor de blindaje***

En este panel de la interfaz solo se digita cuando se desea calcular la densidad de campo magnético con blindaje.

**Frecuencia:** Recuadro para digitar la frecuencia en (Hz) a la cual opera la línea de alta tensión.

**Resistencia:** Recuadro para digitar la resistencia del conductor de blindaje en ( $\Omega/km$ ).

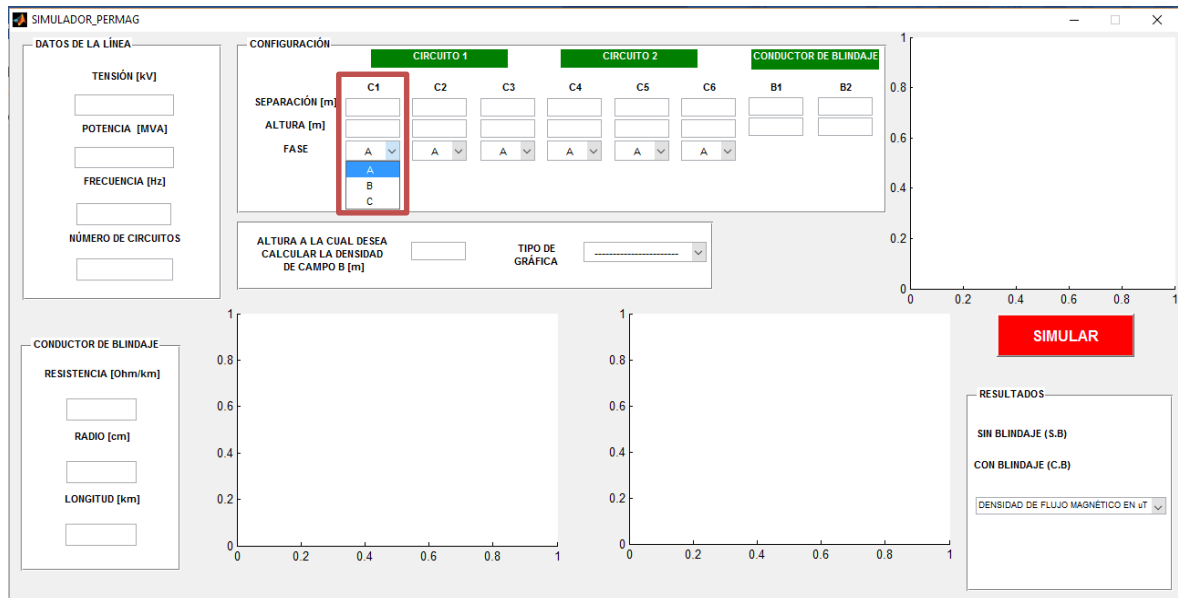
**Radio:** Recuadro para digitar el radio del conductor de blindaje en centímetros (cm).

**Longitud:** Recuadro para digitar la longitud del conductor de blindaje en kilómetros (km).

### **Panel configuración**

En este panel se ubican las coordenadas de los circuitos de la línea de alta tensión y del bucle pasivo. Los textos estáticos (C1, C2, C3, C4, C5, C6, B1 y B2) muestran las posiciones de los conductores que se muestran en la figura de la parte superior derecha de la interfaz. Los recuadros que se encuentran en la columna de C1 son para digitar la separación y la altura del conductor C1, tomando como referencia el centro de la línea (Figura A4).

**Figura A4.** Columna de C1 y menú desplegable (FASE).



El menú desplegable (FASE) es para indicar que fase de la línea se encuentra en esa posición. La herramienta toma por defecto las siguientes referencias:

- La fase A, a  $0^\circ$
- La fase B, a  $-120^\circ$

- La fase C, a  $120^\circ$

**Nota:** Las fases de un circuito no se pueden repetir, es decir, en un circuito no puede aparecer dos veces la fase A o B o C.

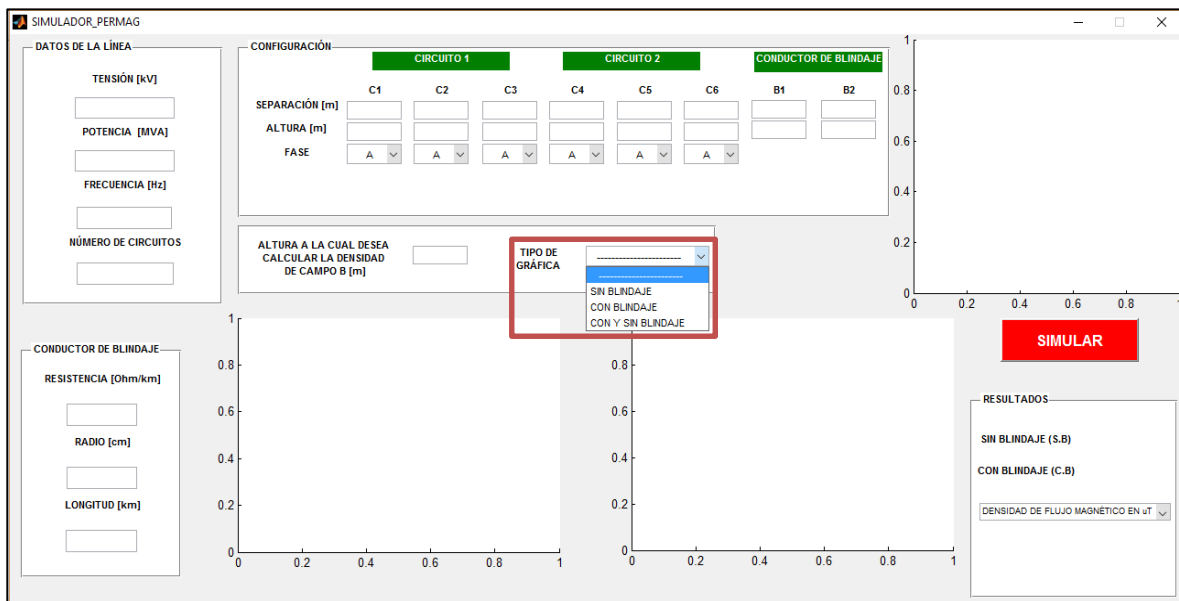
**Altura a la cual se desea calcular la densidad de flujo magnético**

En este recuadro se digita la altura en (m) sobre el nivel del suelo a la cual se desea calcular la densidad de flujo magnético.

**Tipo de gráfica**

En este menú desplegable se elige el tipo de grafica que se desea visualizar (figura A5). La opción sin blindaje muestra el perfil de densidad de flujo magnético generado por la línea de transmisión. La opción con blindaje muestra el perfil de densidad de flujo magnético generado por la línea y el bucle pasivo. Por último, la opción con y sin blindaje muestra el perfil de las dos opciones anteriores en una misma gráfica.

**Figura A5.** Menú desplegable tipo de gráfica.



## BOTÓN SIMULAR

Luego de introducir completamente los datos de entrada en cada uno de los recuadros y menús desplegables, se pulsa el botón SIMULAR que permite visualizar en pantalla, la configuración geométrica de la línea, el perfil lateral de la densidad de flujo magnético y los resultados de la simulación.

**Nota:** Cada vez que se realice una modificación en los datos de entrada se debe pulsar el botón SIMULAR para actualizar el cálculo.

## PANEL RESULTADOS

En este panel se muestra el máximo valor de la densidad de flujo magnético con y sin blindaje. A demás muestra un menú desplegable (figura A6) en el que se puede escoger el tipo de unidades en que se desea visualizar la gráfica del perfil ( $\mu\text{T}$  o  $\text{mG}$ ). Por último, el menú desplegable tiene una opción llamada porcentaje de reducción, que muestra un perfil de porcentaje de reducción cuando en el menú desplegable (TIPO DE GRAFICA) se selecciona la opción con y sin blindaje.

**Figura A6.** Menú desplegable de Resultados.

