



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Compatibilidad Electromagnética de Instalaciones de Media Tensión

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Yumi AMOROSO, Ingrid HABOOSH, Carolina PESCE

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA.

TUTOR Andrés CARDOZO Universidad de la República

TRIBUNAL

Juan Pechiar Universidad de la República
Álvaro Portillo Universidad de la República
Mario Vignolo Universidad de la República

Montevideo
lunes 7 noviembre, 2016

Compatibilidad Electromagnética de Instalaciones de Media Tensión, Yumi AMOROSO, Ingrid HABOOSH, Carolina PESCE.

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).

Contiene un total de 132 páginas.

Compilada el lunes 7 noviembre, 2016.

<http://iie.fing.edu.uy/>

Agradecimientos

Agradecemos a nuestras familias por la contención y el aliento brindado.

También agradecemos a Partiluz por la información otorgada, la disponibilidad de sus empleados y por permitirnos utilizar sus instalaciones.

Además, agradecemos a Carlos Wall, Gastón Mayer, Gustavo Barbera y Fernando Issouribehere de la Universidad Nacional de La Plata - Argentina por su disposición y ayuda brindadas a lo largo del proyecto, así como la información aportada.

Por último, agradecemos a Álvaro Portillo y Filomena Rava por los conocimientos aportados y a Andrés Cardozo por permitirnos incursionar en este tema.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

El proyecto tiene como objetivo elaborar un software que modele la densidad de flujo magnético en instalaciones de Media Tensión.

Se presenta el marco contextual en el cual surge la necesidad de este estudio así como las nociones teóricas pertinentes para el mismo.

Se decide dividir el problema en dos sub-problemas, líneas y transformadores, los cuales se analizan en profundidad. Para ambos se desarrollan modelos, los cuales se simulan con los algoritmos implementados y se afinan con publicaciones y mediciones.

Finalmente, se destacan los resultados encontrados y se presenta el análisis de una subestación.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Abstract

The purpose of this project is to develop a software that models the magnetic flux density in medium voltage installations.

The contextual framework in which the need for this study arises is presented, as well as the relevant theoretical notions for it.

The problem is divided into two sub-problems; lines and transformers, which are analyzed in depth. Models are developed for both; they are simulated with the implemented algorithms and improved with publications and measurements.

Finally, the main results are underlined and the analysis of a substation is presented.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abstract	V
Tabla de contenidos	VII
1. Introducción	1
1.1. Descripción del proyecto	1
1.2. Hipótesis	1
1.3. Definiciones	2
1.4. Organización del documento	2
2. Marco contextual	5
2.1. Decreto 001 – 2714/2013 [1]	5
2.2. Proyecto CEM [2]	6
2.2.1. Objetivos	6
2.2.2. Investigaciones	7
2.2.3. Estándares	7
2.3. Normas ICNIRP para limitar la exposición a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo (1 Hz - 100 kHz) [3]	8
2.3.1. Alcance y propósito	8
2.3.2. Cantidades y unidades	8
2.3.3. Bases científicas para la limitar a la exposición	9
2.3.4. Pautas para limitar la exposición a los campos electromagnéticos	11
2.3.5. Restricciones básicas	12
2.3.6. Niveles de referencia	13
3. Nociones teóricas	15
3.1. Ley de Biot-Savart	15
3.2. Ley de Ampère	17
3.3. Ley de Faraday	17
3.4. Hilo de guardia [4]	18
3.5. Catenaria [5]	20
3.5.1. Aproximación de la catenaria por una parábola	22
3.5.2. Ecuación de catenaria con apoyos en pequeño desnivel	22
3.6. Ecuaciones de Maxwell [6]	23
3.6.1. Método de Elementos Finitos	26

Tabla de contenidos

4. Líneas	31
4.1. Descripción del modelo	31
4.2. Validación con publicaciones	33
4.2.1. Campos Electromagnéticos inducidos por dos ternas de transmisión [7]	33
4.2.2. Impacto de la transposición de fases [8]	35
4.2.3. Campos Electromagnéticos bajo una Línea de Trasmisión y corrientes inducidas en una cerca [9]	40
4.3. Validación con software comercial	42
4.3.1. Comparación de resultados	42
4.4. Validación con mediciones experimentales	44
4.4.1. Características constructivas de la línea normalizada	44
4.4.2. Instrumento de medida	45
4.4.3. Datos y simulaciones	45
4.4.4. Resultados de la medición	47
4.4.5. Análisis de los resultados	49
4.5. Resumen	52
5. Transformadores	53
5.1. Aspectos magnéticos del transformador	53
5.1.1. Flujo de dispersión	53
5.1.2. Corrientes de Foucault	54
5.1.3. Pérdidas parásitas en el transformador	55
5.2. Revisión bibliográfica relacionada	55
5.2.1. Transformer Handbook - ABB [10]	55
5.2.2. Distribution transformers and EMC - SIEMENS [11]	56
5.2.3. Evaluación de los campos electromagnéticos alrededor de los transformadores de potencia - Informe UNE [12]	58
5.3. Transformador 250 kVA 15/0,4 – 0,23 kV	59
5.3.1. Detalles constructivos	59
5.3.2. Programas estudiados	62
5.4. Modelado del transformador	70
5.4.1. Hipótesis primer modelo	70
5.4.2. Relevamiento de campo magnético	72
5.4.3. Hipótesis segundo modelo	74
5.4.4. Hipótesis tercer modelo	76
5.4.5. Hipótesis cuarto modelo	78
5.5. Análisis de los resultados	80
5.5.1. Permeabilidad magnética de la cuba	84
5.6. Factor de seguridad	86
5.7. Cotas	87
5.8. Resumen	88
6. Subestaciones	91
7. Software desarrollado	97
7.1. Plataforma	97
7.2. Arquitectura del software	97
7.2.1. Líneas	97
7.2.2. Transformadores	99

8. Conclusiones	101
8.1. Trabajo a futuro	102
Apéndices	103
A. ICNIRP - Conclusiones de la literatura actual [3]	103
A.1. Neurocomportamiento	103
A.2. Sistema neuroendocrino	104
A.3. Trastornos neurodegenerativos	105
A.4. Trastornos cardiovasculares	105
A.5. Reproducción y desarrollo	105
A.6. Cáncer	106
B. Interfaz gráfica	107
B.1. Líneas	107
B.1.1. Simple Terna	108
B.1.2. Doble Terna	110
B.2. Transformadores	111
Referencias	113
Índice de figuras	115
Índice de tablas	117

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Descripción del proyecto

En Uruguay se aprobó el Decreto 001 – 2714/2013, el cual establece en nuestro país los valores límites para la exposición humana a campos electromagnéticos (CEM), los cuales se adoptan de la Recomendación Internacional ICNIRP. Dicho decreto tiene un carácter precautorio, el cual busca proteger la salud de las personas ante la exposición a campos electromagnéticos provenientes de una instalación o dispositivo emisor.

Hasta la fecha, no se han tenido en cuenta valores límites como restricciones en la sistemática de diseño de una instalación de Media Tensión. Por esta razón, tanto en las instalaciones existentes como en las proyectadas, se podrían estar superando los límites establecidos en la ICNIRP. Solucionar el problema puede resultar muy costoso una vez que la instalación ya está construida o diseñada.

El proyecto apunta a elaborar un software que permita modelar el campo magnético de la instalación de forma de reconocer las zonas más críticas. El software calcula casos sencillos de compatibilidad electromagnética que pueden ser evaluados según las fórmulas que los rigen, y casos más complejos como instalaciones de Media Tensión. En la medida que las herramientas disponibles en forma comercial implican, por lo general, trabajar con las ecuaciones diferenciales que rigen los campos electromagnéticos, se intentó dotar al software de una interfaz gráfica amigable más adecuada a las tareas de un proyectista de Media Tensión, que realiza cálculos sobre un sistema eléctrico. Mayores detalles de la interfaz desarrollada se encuentran en el Apéndice B. Los resultados obtenidos pretenden ser un primer paso para la elaboración de una guía futura que establezca una sistemática de diseño.

1.2. Hipótesis

En Uruguay, la frecuencia utilizada para la generación, transporte y distribución de energía eléctrica es 50 Hz, la cual recibe el nombre de frecuencia industrial. Las cargas eléctricas que circulan por los conductores y que se mueven alternativamente a dicha frecuencia, son la fuente de los campos eléctricos y magnéticos de 50 Hz. Para esta frecuencia es posible desacoplar los campos, considerando el campo magnético y el eléctrico de forma independiente, dado que al ser la oscilación pequeña se los puede considerar a ambos como cuasi estáticos.

En cuanto a los efectos sobre el organismo, ambos campos inducen tensiones y corrientes eléctricas en el mismo.

En el caso de los campos eléctricos, la magnitud de las corrientes inducidas es muy pequeña en comparación con los umbrales a partir de los cuales se perciben efectos eléctricos. Esto no ocurre para los campos magnéticos, ya que los umbrales para la estimulación nerviosa y muscular son bajos.

Capítulo 1. Introducción

Por lo tanto, el proyecto toma como hipótesis que se trabaja a frecuencia industrial, para la cual es posible desacoplar el campo eléctrico del magnético. Se considera únicamente para el desarrollo del software el campo magnético debido a la importancia de sus efectos.

1.3. Definiciones

Compatibilidad electromagnética

Se define la compatibilidad electromagnética como la “habilidad de un sistema de no causar interferencias electromagnéticas a otros equipos, pero al mismo tiempo ha de ser insensible a las emisiones que pueden causar otros sistemas”¹. Una interferencia electromagnética es “la emisión de energía electromagnética que degrada o perjudica la calidad de una señal o el funcionamiento de un sistema”. En este trabajo se profundiza acerca de la interferencia electromagnética generada por líneas y transformadores en forma de densidad de flujo magnético en sus alrededores y su efecto perjudicial en la salud de las personas.

Instalaciones de Media Tensión

Se consideran instalaciones de Media Tensión (MT) aquellas cuyo voltaje de operación es superior a 1 *kV* e inferior o igual a 72,5 *kV*. Se conoce como Subtransmisión a las líneas de MT cuya tensión máxima de servicio se encuentra entre 24 *kV* y 72,5 *kV*. En Uruguay, los valores normalizados son: 6,4 *kV*, 15 *kV*, 22 *kV*, 31,5 *kV* y 60 *kV*. Dichas instalaciones pertenecen a la red de Distribución, la cual se ocupa de la conducción, dentro de una ciudad, localidad o centro poblado, de la energía eléctrica necesaria a los usuarios, a tensiones medias o bajas.

Los voltajes menores a 1 *kV* son considerados como Baja Tensión, mientras que los superiores a 72,5 *kV* Alta Tensión.

1.4. Organización del documento

El documento está organizado en capítulos, de los cuales se presenta una breve descripción a continuación.

Introducción En el Capítulo 1 se presenta el proyecto, realizando una descripción del mismo y destacando sus principales objetivos. Además, se definen las hipótesis utilizadas a lo largo de éste y algunos conceptos relevantes.

Marco contextual En el Capítulo 2 se presenta el marco en el cual surge el proyecto, detallándose los documentos pertinentes. En primer lugar, se presenta el Decreto 001 – 2714/2013, cuya aprobación motiva el surgimiento del proyecto, ya que regula jurídicamente la exposición a CEM de baja frecuencia. En el mismo, se adoptan como límites máximos admitidos para la exposición a radiaciones no ionizantes los recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y contenidos en la norma ICNIRP (International Commission on Non-ionizing Radiation Protection). Por este motivo, se presentan también en este capítulo el Proyecto CEM, creado por la Organización Mundial de la Salud con el objetivo de investigar los efectos perjudiciales para la salud de las personas expuestas a CEM, y un resumen de las normas ICNIRP, en el cual se incluyen los valores de referencia adoptados.

¹*Introducción a la compatibilidad electromagnética* - Universidad de Santiago de Compostela - Curso 2007/2008

1.4. Organización del documento

Nociones teóricas En el Capítulo 3 se presentan las nociones teóricas consideradas a lo largo del proyecto. Se introducen la Ley de Biot-Savart y la Ley de Ampère, básicas para el cálculo de la densidad de flujo magnético generado por un conductor, así como la Ley de Faraday para el cálculo de voltaje inducido por un flujo magnético variable. Esta última se utiliza en la validación del software desarrollado. Es también para la validación del programa que se necesita conocer la corriente por el hilo de guardia de una línea aérea, por lo que se presenta en este capítulo un método para calcularla. A lo largo del proyecto se detecta la importancia de la forma que describen los conductores en una línea aérea trifásica en el valor de densidad de flujo magnético generado por la misma, por lo que se incluye en este capítulo las ecuaciones que representan dicha forma, la cual se conoce como catenaria. Por último, se presentan las Ecuaciones de Maxwell, fundamentales para el cálculo de la densidad de flujo magnético generado por un transformador y el Método de los Elementos Finitos como técnica numérica para resolverlas.

Líneas y transformadores Dado que el objetivo del proyecto es elaborar un software que modele la densidad de flujo magnético en una instalación de Media Tensión, se estudian en primera instancia los campos generados por los elementos que la componen: líneas y transformadores. En los Capítulos 4 y 5 se detallan los modelos de línea y transformador utilizados respectivamente, así como la validación del software desarrollado con publicaciones, software comerciales y mediciones experimentales.

Subestaciones En el Capítulo 6 se hace hincapié en los principales resultados encontrados y se exponen las dificultades halladas. Asimismo, se presenta una publicación donde se destacan las zonas críticas relativas a la densidad de flujo magnético en una subestación.

Conclusiones En el Capítulo 8 se destacan las principales conclusiones del proyecto y se mencionan posibles trabajos a futuro.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 2

Marco contextual

2.1. Decreto 001 – 2714/2013 [1]

El Decreto 001 – 2714/2013, con fecha de aprobación del día 28 de febrero de 2014, involucra al Ministerio de Salud Pública, al Ministerio de Industria, Energía y Minería y al Ministerio de Trabajo y Seguridad Social en la creación de un “marco jurídico regulador que establezca los límites para la exposición humana a los Campos Electromagnéticos generados por frecuencias iguales o inferiores a 300 GHz.”

Se destacan los siguientes artículos:

Artículo 1 (Ámbito de Aplicación) El Decreto “*se aplica a toda exposición humana a los Campos Electromagnéticos (CEM) en toda la jurisdicción nacional.*”

Artículo 2 (Objeto) El Decreto “*tiene como objeto establecer los límites de la exposición humana a los Campos Electromagnéticos (CEM), los cuales contemplan la adecuada aplicación del principio precautorio, con el fin de proveer protección contra efectos adversos a la salud, provenientes de cualquier instalación o dispositivo emisor de tales campos*”

Artículo 3 (Alcance) El Decreto “*establece los límites máximos de exposición a Campos Electromagnéticos para el público y trabajadores generados por emisiones de frecuencias que se encuentran entre 1 Hz y 300 GHz...*”

Artículo 4 (Glosario)

- *Campos Electromagnéticos (CEM): Entidad física que transporta o almacena energía en un espacio libre y que se manifiesta mediante fuerzas ejercidas sobre cargas eléctricas, que incluyen los campos eléctricos y magnéticos estáticos así como los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo con frecuencias no superiores a 300 GHz.*
- *Efecto adverso en la salud: Es aquel que causa un deterioro detectable de la salud de los individuos expuestos, ya sea en el corto o en el mediano plazo.*
- *Exposición a Campos Electromagnéticos: Sometimiento de una persona a un Campo Eléctrico, Magnético o Electromagnético o a corrientes de contacto diferentes de aquellas originadas por procesos fisiológicos en el cuerpo y otros fenómenos naturales.*

Capítulo 2. Marco contextual

- *Exposición ocupacional a Campos Electromagnéticos: Toda exposición a los Campos Electromagnéticos experimentadas por personas durante la ejecución de su trabajo.*
- *Exposición poblacional a Campos Electromagnéticos: Toda exposición a los Campos Electromagnéticos experimentadas por el público en general, comprendiendo individuos de todas las edades y de estados de salud variables.*
- *Límites de exposición: Límite superior para la exposición humana a los Campos Electromagnéticos, con el objetivo de proteger contra respuestas fisiológicas adversas que están causalmente relacionadas a dichos Campos.*
- *Nivel de referencia: Nivel de exposición a los Campos Electromagnéticos, estipulado para propósitos de la evaluación práctica de la exposición, con el fin de determinar si las Restricciones Básicas son excedidas.*
- *Radiaciones no ionizantes: Radiaciones del Espectro Electromagnético en frecuencias inferiores a 300 GHz, que no tienen energía suficiente para ionizar la materia.*
- *Restricciones básicas: Restricciones sobre la exposición a Campos Eléctricos, Magnéticos y Electromagnéticos que están basadas directamente sobre efectos en la salud establecidos...*

Artículo 5 (Límites de exposición a Campos Electromagnéticos) “Se adoptan como Límites Máximos permitidos de exposición a Radiaciones No Ionizantes aquellos recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y contenidos en las Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección contra las radiaciones No Ionizantes (ICNIRP)...”

Para el rango entre 1 Hz y 100 kHz se adoptan las “Directrices para limitar la exposición a los campos eléctricos y magnéticos variables con el tiempo (entre 1 Hz y 100 kHz) - ICNIRP 2010” [3]

En la tabla 2.1 se presentan las Restricciones Básicas, mientras que en las tablas 2.2 y 2.3 se muestran los Niveles de Referencia para la exposición (a campos eléctricos y magnéticos) ocupacional y poblacional respectivamente.

2.2. Proyecto CEM [2]

En el año 1996, en respuesta a la creciente preocupación pública por los efectos sobre la salud debido al aumento de la exposición a campos electromagnéticos, la Organización Mundial de la Salud (OMS) creó el Proyecto Internacional CEM. Sus actividades se coordinan y se fomentan desde la sede de la OMS en Ginebra (Suiza). Es la única Organización de las Naciones Unidas que tiene un mandato claro de investigar los efectos perjudiciales para la salud de las personas, frente a la exposición a radiaciones no ionizantes. El Proyecto CEM se gestiona desde la Unidad de Radiación e Higiene del Medio, que forma parte del Grupo Orgánico de Desarrollo Sostenible y el Medio Ambiente de la OMS.

2.2.1. Objetivos

- *Dar una respuesta internacional y coordinada a las inquietudes que suscitan los posibles efectos sanitarios de la exposición a los CEM,*
- *Evaluar las publicaciones científicas, y elaborar informes de actualidad sobre los efectos sanitarios,*
- *Descubrir aspectos insuficientemente conocidos en los que una investigación más a fondo permitiría evaluar mejor los riesgos,*

2.2. Proyecto CEM [2]

- *Alentar la creación de programas de investigación especializados y de alta calidad,*
- *Incorporar resultados de las investigaciones en monografías de la serie Criterios de Salud Ambiental de la OMS, en las que se evaluarán metódicamente los riesgos sanitarios de la exposición a los CEM,*
- *Facilitar el desarrollo de normas internacionalmente aceptables sobre la exposición a los CEM,*
- *Facilitar, a las autoridades nacionales y de otros ámbitos, información sobre la gestión de los programas de protección contra los CEM, y en particular monografías sobre la percepción, comunicación y gestión de los riesgos derivados de los CEM,*
- *Asesorar a las autoridades nacionales y de otros ámbitos sobre los efectos sanitarios y ambientales de los CEM, y sobre las eventuales medidas o actuaciones de protección necesarias.*

2.2.2. Investigaciones

En cuanto a las investigaciones realizadas para radiaciones de distintas frecuencias, todas han indicado que las exposiciones inferiores a los límites recomendados por la International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP) no producen ningún efecto perjudicial para la salud. No obstante, todavía existen lagunas de conocimiento a abordar para mejorar las evaluaciones.

2.2.3. Estándares

En todo el mundo existe una disparidad en cuanto a los límites de exposición a los CEM, lo cual ha ocasionado una creciente ansiedad en la sociedad. Por esta razón, la OMS ha iniciado un proceso de armonización mundial para dichos límites.

El Proyecto Internacional CEM reúne a 54 países y 8 organizaciones internacionales para el desarrollo común de normas para este tema, con el objetivo de dar un mismo grado de seguridad para todos.

El umbral es considerado como el nivel más bajo de exposición, por debajo del cual no han sido encontrados peligros para la salud. A causa de un conocimiento incompleto de los efectos biológicos, existe una imprecisión en la determinación del mismo, razón por la cual, existirá un rango de incertidumbre a modo de factor de seguridad.

Los ejemplos de fuentes de incertidumbre en los niveles de umbral incluyen:

- La extrapolación de datos de experimentos en animales a los efectos en las personas
- Diferencias en la susceptibilidad de diferentes grupos o personas
- Incertidumbres estadísticas en la función dosis - respuesta
- Estimación de la dosis
- Posibilidad de efectos combinados de exposiciones a diferentes frecuencias y otros factores ambientales

2.3. Normas ICNIRP para limitar la exposición a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo (1 Hz - 100 kHz) [3]

La norma establece pautas para la protección de la salud de las personas expuestas a campos eléctricos y magnéticos de frecuencias comprendidas en el rango de 1 Hz a 100 kHz.

2.3.1. Alcance y propósito

Para la elaboración de la misma se evaluaron estudios que trataban tanto los efectos directos como indirectos de la exposición a los campos electromagnéticos. Los efectos directos surgen de la interacción directa de los campos con el cuerpo, mientras que los efectos indirectos implican la interacción con un objeto conductor donde el potencial eléctrico del conductor es diferente al del cuerpo.

En la norma se asegura que las restricciones están basadas en pruebas que evidenciaron efectos agudos; el conocimiento disponible actualmente indica que la adherencia a dichas restricciones protege a los trabajadores y al público de los efectos adversos para la salud que surgen de la exposición a los CEM de baja frecuencia. Se dice que los datos epidemiológicos y biológicos relativos a enfermedades crónicas fueron revisados con cuidado, concluyéndose que no hay pruebas convincentes de que dichas enfermedades estén causalmente relacionadas con la exposición a CEM de baja frecuencia.

Quedan fuera del alcance de la norma los estándares de rendimiento de productos, estándares que intentan limitar las emisiones de CEM provenientes de dispositivos específicos bajo condiciones de testeo específicas. Tampoco se ocupa de las técnicas usadas para medir las distintas cantidades físicas que caracterizan los campos.

Por último, el cumplimiento de las pautas establecidas en la norma no asegura que no ocurran interferencias o efectos sobre dispositivos médicos como prótesis metálicas, marcapasos cardíacos, desfibriladores implantados e implantes cocleares.

2.3.2. Cantidades y unidades

Mientras que el campo eléctrico está asociado únicamente a la presencia de una carga eléctrica, el campo magnético es el resultado del movimiento físico de la carga (corriente eléctrica).

El campo eléctrico \vec{E} ejerce una fuerza sobre una carga eléctrica y se la expresa en voltios por metro (V/m). El campo magnético \vec{B} puede ejercer fuerza sobre cargas eléctricas si varía con el tiempo y/o dichas cargas están en movimiento.

Ambos campos tienen magnitud y dirección. El magnético puede ser especificado de dos formas:

- Como densidad de flujo magnético, \vec{B} , expresado en Tesla (T)
- Como intensidad de campo magnético, \vec{H} , expresada en ampere por metro (A/m)

Ambas cantidades están vinculadas según la siguiente ecuación:

$$\vec{B} = \mu * \vec{H} \quad (2.1)$$

donde μ es la constante de proporcionalidad, conocida como permeabilidad magnética. Su valor para el vacío y el aire, como para materiales no magnéticos, es $4 * 10^{-7}$ expresado en Henrios por metro (H/m).

La exposición a CEM variables en el tiempo resulta en campos eléctricos internos, corrientes corporales y energía absorbida por los tejidos que dependen de los mecanismos de acoplamiento y la frecuencia involucrada.

El campo interno \vec{E}_i y la densidad de corriente \vec{J} se relacionan por la ley de Ohm:

$$\vec{J} = \sigma * \vec{E}_i \quad (2.2)$$

2.3. Normas ICNIRP para limitar la exposición a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo (1 Hz - 100 kHz) [3]

donde σ es la conductividad eléctrica del medio.

2.3.3. Bases científicas para la limitar a la exposición

La International Agency for Research on Cancer (IARC), la International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP) y la World Health Organization (WHO) han revisado los efectos biológicos de la exposición a CEM de baja frecuencia. Dichas investigaciones dieron la base científica para la elaboración de las pautas incluidas en la norma.

La exposición a campos eléctricos de baja frecuencia puede causar respuestas biológicas bien definidas, que van desde la percepción a la molestia.

Los únicos efectos que se detectan en voluntarios expuestos a campos magnéticos de baja frecuencia son: la estimulación de los tejidos nerviosos central y periférico, y la inducción en la retina de fosfenos.¹ La retina es parte del Sistema Nervioso Central y es considerada como un apropiado, aunque conservador, modelo para los efectos de campos eléctricos inducidos en el circuito neuronal del Sistema Nervioso Central en general.

Mecanismos de acoplamiento entre los campos y el cuerpo

Los cuerpos humanos y animales perturban en forma significativa la distribución espacial de un campo eléctrico de baja frecuencia. A bajas frecuencias el cuerpo es un buen conductor y las líneas de campo perturbadas externas al cuerpo son prácticamente perpendiculares a la superficie del mismo. En la superficie del cuerpo expuesto se inducen cargas oscilantes, las cuales producen corrientes dentro del mismo.

Las principales características de dosimetría para la exposición de los humanos a campos eléctricos de baja frecuencia incluyen:

- El campo eléctrico inducido dentro del cuerpo es considerablemente más pequeño que el campo externo, entre cinco y seis órdenes de magnitud a una frecuencia de 50-60 Hz.
- Para un campo eléctrico externo dado, los campos de mayor fuerza son inducidos cuando el cuerpo humano está en perfecto contacto con la tierra a través de los pies (eléctricamente aterrado) y los más débiles se inducen cuando el cuerpo se encuentra aislado de tierra.
- La corriente total que fluye por un cuerpo en perfecto contacto con la tierra está determinada por el tamaño y la forma del cuerpo, incluyendo la postura, más que por la conductividad de los tejidos.
- La distribución de las corrientes inducidas a través de los órganos y tejidos está determinada por la conductividad de los tejidos.
- Existe un efecto indirecto, cuando la corriente en el cuerpo es producida por el contacto con un objeto conductor localizado en un campo eléctrico.

Para campos magnéticos, la permeabilidad del tejido es la misma que la del aire, por lo que el campo en el tejido es igual al externo. Los cuerpos humanos y animales no perturban significativamente el campo.

La interacción más relevante del campo magnético con el cuerpo es la inducción de campos eléctricos y corrientes por los tejidos.

Las principales características de dosimetría para la exposición de los humanos a campos magnéticos de baja frecuencia incluyen:

¹Percepción de una luz débil parpadeante en la periferia del campo visual

Capítulo 2. Marco contextual

- Para un campo magnético de magnitud y orientación dadas, se inducen campos eléctricos más altos en personas de mayor altura, debido a que los posibles bucles de conducción son más largos.
- El campo eléctrico y la corriente inducidos dependen de la orientación del campo magnético externo respecto al cuerpo. Generalmente los campos inducidos en el cuerpo son mayores cuando el campo está alineado desde la parte delantera a la parte posterior del cuerpo, aunque para ciertos órganos los máximos valores de campo ocurren para orientaciones diferentes.
- Los campos eléctricos más débiles son inducidos por campos magnéticos orientados a lo largo del eje principal del cuerpo.
- La distribución de los campos eléctricos inducidos está afectada por la conductividad de los distintos órganos y tejidos.

Conclusiones de la literatura científica actual

La información reunida por la norma acerca de los resultados de las investigaciones existentes sobre el efecto de la exposición a CEM, se pueden encontrar en el Apéndice A.

Justificación de las pautas dadas por la ICNIRP

Efectos agudos Existen ciertos efectos agudos establecidos sobre el sistema nervioso como producto de la exposición a campos electromagnéticos de baja frecuencia: estimulación directa tanto del tejido nervioso como del muscular y la inducción de fosfenos en la retina. También existe evidencia científica indirecta de que funciones cerebrales, como el procesamiento visual y la coordinación motora, pueden ser afectadas transitoriamente por campos eléctricos inducidos. Todos estos efectos tienen umbrales por debajo de los cuales no ocurren y pueden ser evitados mediante el cumplimiento de restricciones básicas en los campos eléctricos inducidos en el cuerpo.

Siguiendo las recomendaciones realizadas en relación con las directrices sobre los límites de exposición a campos magnéticos estáticos, ICNIRP considera que existen circunstancias ocupacionales en las cuales, con el entrenamiento y el asesoramiento adecuados, es razonable que los trabajadores experimenten (en forma voluntaria y a sabiendas) efectos transitorios como fosfenos en la retina y posibles cambios pequeños en algunas funciones cerebrales, ya que no se cree que los mismos resulten en efectos a largo plazo o patológicos. En estas circunstancias, se debería evitar la exposición de todas las partes del cuerpo de forma de evitar la estimulación nerviosa mielínica periférica y central.

La exposición a campos eléctricos de baja frecuencia causa respuestas biológicas bien definidas debido a los efectos de la carga eléctrica superficial. La prevención de dichos efectos es el objetivo de los niveles de referencia.

Efectos crónicos Según la ICNIRP, la evidencia científica existente acerca de que la exposición prolongada a campos magnéticos de baja frecuencia causa un aumento en el riesgo de leucemia infantil, es muy débil para ser la base de las pautas establecidas en la norma. En particular, si la relación no es causal, ningún beneficio a la salud surgirá de una reducción a la exposición.

Dosimetría Históricamente, los modelos de campo magnético asumieron que el cuerpo tiene una conductividad homogénea e isotrópica, y aplicaron modelos simples de bucles conductores circulares para estimar las corrientes inducidas en los diferentes órganos y regiones del cuerpo.

Los campos eléctricos, inducidos por campos magnéticos y eléctricos variantes en el tiempo, fueron computados usando modelos elipsoidales homogéneos simples. Recientemente, cálculos más reales basados en modelos heterogéneos anatómicamente y eléctricamente refinados, resultaron en un mejor conocimiento de los campos eléctricos internos inducidos en el cuerpo.

2.3. Normas ICNIRP para limitar la exposición a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo (1 Hz - 100 kHz) [3]

Los resultados dosimétricos más útiles para el propósito de la norma se obtuvieron de cálculos de alta resolución de campo eléctrico inducido con tamaño de voxel por debajo de los 4 mm. El campo eléctrico inducido en el cuerpo es máximo cuando los campos externos son homogéneos y están en la dirección paralela al eje del cuerpo (campo \vec{E}) o perpendicular (campo \vec{H}). De acuerdo a dichos cálculos, el pico local máximo de campo eléctrico inducido por un campo magnético de 50 Hz en el cerebro es de aproximadamente 23-33 mV/m por mT , dependiendo de la orientación del campo y el modelo del cuerpo. No hay disponible actualmente un factor de conversión para el tejido nervioso periférico. Por lo tanto, la piel, que contiene terminaciones del nervio periférico, fue elegida como el tejido correspondiente a un peor caso. El campo eléctrico inducido en la piel por un campo magnético de 50 Hz es de aproximadamente 20-60 mV/m por mT . El máximo campo eléctrico local inducido por un campo eléctrico de 50 Hz en el cerebro es de aproximadamente 1.7-2.6 mV/m por kV/m, mientras que en la piel es aproximadamente 12-33 mV/m por kV/m.

Dada la incertidumbre en la dosimetría disponible como la influencia de los parámetros del cuerpo en la obtención de los niveles de referencia, la ICNIRP toma una postura conservadora en la obtención de niveles de referencia desde las restricciones básicas.

2.3.4. Pautas para limitar la exposición a los campos electromagnéticos

Existe una diferenciación en las directrices dadas para la exposición ocupacional y las dadas para la exposición del público en general.

La exposición ocupacional refiere a los adultos expuestos en su lugar de trabajo a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo, de frecuencias entre 1 Hz y 10 MHz, generalmente bajo condiciones conocidas y como resultado de realizar sus actividades laborales regulares o asignadas.

Por el contrario, el público general corresponde a los individuos de todas las edades y con distintos estados de salud que pueden aumentar la variabilidad de las susceptibilidades individuales. En muchos casos, miembros del público general no son conscientes de su exposición a campos electromagnéticos. Esto provoca que la ICNIRP adopte restricciones más fuertes para la exposición del público general que para la exposición ocupacional.

Abordando la incertidumbre científica

Toda la información científica y su interpretación están sujetas a cierto grado de incertidumbre. Ejemplos de ello son la variabilidad metodológica y las diferencias entre individuos, entre especies y entre razas. Dichas incertidumbres son compensadas por factores de reducción. Sin embargo, no existe suficiente información de todas las fuentes de incertidumbre para proporcionar una base rigurosa sobre la cual establecer los factores de reducción, en toda la gama de frecuencias y para todos los patrones de modulación. Por lo tanto, el grado de precaución que se aplica en la interpretación de la base de datos disponible y en la definición de los factores es en gran medida un asunto de juicio experto.

Restricciones básicas y niveles de referencia

Se le llama restricciones básicas a las limitaciones de la exposición que están basadas en la magnitud o magnitudes físicas directamente relacionadas con los efectos establecidos sobre la salud. En la ICNIRP, la magnitud física utilizada para especificar las restricciones básicas en la exposición a los campos electromagnéticos es la intensidad del campo eléctrico interno \vec{E}_i , dado que es el campo eléctrico que afecta las células nerviosas y otras células eléctricamente sensibles.

La intensidad del campo eléctrico interno es difícil de evaluar. Por lo tanto, a efectos prácticos de la evaluación de la exposición, la ICNIRP proporciona niveles de referencia para la exposición. La mayoría de estos niveles se derivan de las restricciones básicas pertinentes utilizando mediciones y/o

Capítulo 2. Marco contextual

técnicas computacionales, pero algunos abordan la percepción y los efectos indirectos adversos de la exposición a campos electromagnéticos. Las magnitudes derivadas son:

- Intensidad de campo eléctrico: E
- Intensidad de campo magnético: H
- Densidad de flujo magnético: B
- Corrientes que fluyen a través de las extremidades: I_L

La magnitud que aborda los efectos indirectos es la corriente de contacto: I_C .

En cualquier situación de exposición particular, los valores medidos o calculados de cualquiera de estas magnitudes pueden ser comparados con los niveles de referencia apropiados.

El cumplimiento del nivel de referencia garantizará el cumplimiento de la restricción básica pertinente. Si el valor medido o calculado supera el nivel de referencia, no significa necesariamente que se supere la restricción básica. Sin embargo, cuando un nivel de referencia es superado, es necesario comprobar el cumplimiento de la restricción básica pertinente y determinar si las medidas de protección son necesarias.

2.3.5. Restricciones básicas

El principal objetivo de la norma ICNIRP es establecer las directrices para limitar la exposición a campos electromagnéticos, de forma de proporcionar protección frente a los efectos adversos para la salud. Como se mencionó anteriormente, los riesgos surgen de respuestas transitorias del sistema nervioso, incluyendo la estimulación de los nervios periférico y central, la inducción de fosfenos en la retina y posibles efectos sobre algunos aspectos de la función cerebral.

Para frecuencias en el rango de 10-25 Hz, la exposición ocupacional debe ser limitada a campos que inducen campos eléctricos en el tejido del Sistema Nervioso Central de la cabeza de una intensidad menor a 50 mV/m, de forma de evitar la inducción de fosfenos en la retina. Esta restricción debería prevenir cualquier efecto transitorio en las funciones cerebrales, los cuales no se consideran adversos para la salud. Sin embargo, ICNIRP reconoce que pueden resultar perturbadores en algunas circunstancias ocupacionales y deben ser evitados, pero no se aplica ningún factor de reducción adicional.

Para frecuencias superiores e inferiores, los umbrales para la inducción de fosfenos aumentan rápidamente, intersectándose con los umbrales para la estimulación periférica y central del nervio mielínico a 400 Hz.

En ambientes controlados, donde los trabajadores son informados acerca de los posibles efectos transitorios, la exposición debe ser limitada a campos que inducen campos eléctricos (en la cabeza y en el cuerpo) de menos de 800 mV/m, de manera de evitar la estimulación periférica y central del nervio mielínico. Se aplica un factor de reducción de 5 a un umbral de estimulación de 4 V/m, de forma de abarcar las incertidumbres descritas anteriormente.

Para el público en general se aplica un factor de reducción de 5 para el tejido del Sistema Nervioso Central de la cabeza, dando una restricción básica de 10 mV/m entre 10-25 Hz. Para frecuencias superiores e inferiores, los umbrales aumentan, intersectándose con las restricciones básicas que protegen contra la estimulación periférica y central del nervio mielínico a 1000 Hz. El factor de reducción de 10 resulta en una restricción básica de 400 mV/m, la cual debe aplicarse a los tejidos de todo el cuerpo.

En la tabla 2.1 se encuentran las restricciones básicas para la exposición humana a campos eléctricos y magnéticos variantes en el tiempo (valores RMS).

2.3. Normas ICNIRP para limitar la exposición a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo (1 Hz - 100 kHz) [3]

Características de la exposición	Rango de frecuencias	Campo eléctrico interno (V/m)
Exposición ocupacional		
Tejido del SNC de la cabeza	1 Hz - 10 Hz	0.5/f
	10 Hz - 25 Hz	0.05
	25 Hz - 400 Hz	0.002*f
	400 Hz - 3 kHz	0.8
	3 kHz - 10 MHz	0.00027*f
Todos los tejidos de la cabeza y del cuerpo	1 Hz - 3 kHz	0.8
	3 kHz - 10 MHz	0.00027*f
Exposición del público general		
Tejido del SNC de la cabeza	1 Hz - 10 Hz	0.1/f
	10 Hz - 25 Hz	0.01
	25 Hz - 1000 Hz	0.0004*f
	1000 Hz - 3 kHz	0.4
	3 kHz - 10 MHz	0.000135*f
Todos los tejidos de la cabeza y del cuerpo	1 Hz - 3 kHz	0.4
	3 kHz - 10 MHz	0.000135*f

Tabla 2.1: Restricciones básicas para la exposición humana a campos eléctricos y magnéticos variantes en el tiempo

Promedio de tiempo

Las restricciones en los campos eléctricos internos inducidos por campos eléctricos o magnéticos, que incluyen transitorios o picos de campo de muy corta duración, se consideran como valores instantáneos que no deben ser promediados.

Promedio espacial de campo eléctrico inducido

Es importante definir la distancia o el volumen sobre el cual el campo eléctrico inducido debe ser promediado. ICNIRP recomienda determinarlo como un vector promedio del campo en un pequeño volumen de $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$.

2.3.6. Niveles de referencia

Los niveles de referencia se obtienen de las restricciones básicas mediante modelado matemático usando información publicada.

Se calculan para la condición de máximo acoplamiento entre el campo y el individuo expuesto, otorgando entonces protección máxima. Además, se tiene en cuenta la dependencia con la frecuencia e incertidumbres en la dosimetría.

Los niveles consideran dos efectos distintos. Aproximan una combinación de los campos eléctricos inducidos en el cerebro, relevantes para los efectos en el Sistema Nervioso Central (SNC), y de los campos eléctricos inducidos en cualquier otro tejido corporal que no pertenezca al SNC, relevantes para los efectos en el Sistema Nervioso Periférico.

Entre 25 Hz y 10 MHz, los niveles de referencia se basan únicamente en la restricción básica sobre campos eléctricos inducidos. Por lo tanto, no proveen un margen suficiente para prevenir los efectos de la estimulación por corrientes de contacto bajo todas las condiciones posibles en el rango de frecuencias indicado.

Para exposición del público general a campos eléctricos de hasta 10 MHz, previenen efectos indirectos adversos (shocks y quemaduras) para más del 90% de los individuos expuestos. Además, para campos eléctricos de hasta 50 Hz, incluyen un margen suficiente para prevenir los efectos de la carga eléctrica superficial.

Capítulo 2. Marco contextual

En las tablas siguientes se resumen los niveles de referencia para la exposición ocupacional y del público en general.

Rango de frecuencias	Intensidad de campo eléctrico E (kV/m)	Intensidad de campo magnético H (A/m)	Densidad de flujo magnético B (T)
1 Hz - 8 Hz	20	$1,63x10^5/f^2$	$0,2/f^2$
8 Hz - 25 Hz	20	$2x10^4/f$	$2,5x10^2/f$
25 Hz - 300 Hz	$5x10^2/f$	$8x10^2$	$1x10^{-3}$
300 Hz - 3 kHz	$5x10^2/f$	$2,4x10^5/f$	$0,3/f$
3 kHz - 10 MHz	$1,7x10^{-1}$	80	$1x10^{-4}$

Tabla 2.2: Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos

Rango de frecuencias	Intensidad de campo eléctrico E (kV/m)	Intensidad de campo magnético H (A/m)	Densidad de flujo magnético B (T)
1 Hz - 8 Hz	5	$3,2x10^4/f^2$	$4x10^{-2}/f^2$
8 Hz - 25 Hz	5	$4x10^3/f$	$5x10^{-3}/f$
25 Hz - 50 Hz	5	$1,6x10^2$	$2x10^{-4}$
50 Hz - 400 Hz	$2,5x10^2/f$	$1,6x10^2$	$2x10^{-4}$
400 Hz - 3 kHz	$2,5x10^2/f$	$6,4x10^4/f$	$8x10^{-2}/f$
3 kHz - 10 MHz	$8,3x10^2$	21	$2,7x10^{-5}$

Tabla 2.3: Niveles de referencia para exposición poblacional a campos eléctricos y magnéticos

Capítulo 3

Nociones teóricas

3.1. Ley de Biot-Savart

La Ley de Biot-Savart establece que el campo magnético producido por una corriente cualquiera en un punto, está determinado por la ecuación 3.1:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{d\vec{l} \times \hat{u}_r}{r^2} \quad (3.1)$$

Donde:

- \vec{B} = Densidad de flujo magnético
- μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío
- $d\vec{l}$ = Diferencial de longitud
- I = Intensidad de corriente que circula por $d\vec{l}$
- \hat{u}_r es un vector unitario que une el elemento de corriente $I \cdot d\vec{l}$ con el punto donde se calcula \vec{B}

La ecuación 3.2 corresponde a la forma diferencial de la ecuación 3.1. Cada elemento infinitesimal de corriente ($I \cdot d\vec{l}$) del conductor induce un aporte infinitesimal de campo $d\vec{B}$, perpendicular tanto a $I \cdot d\vec{l}$ como a \hat{u}_r .

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \hat{u}_r}{r^2} \quad (3.2)$$

El \vec{B} en un punto dado del espacio resulta de la suma de los $d\vec{B}$ originados por todos los elementos de corriente del conductor.

Campo magnético inducido por un conductor rectilíneo infinito

En este caso particular, se dispone de una corriente eléctrica en línea recta, lo cual simplifica las ecuaciones antes mencionadas.

Las líneas de campo magnético son circunferencias concéntricas, por lo que \vec{B} es tangente a la circunferencia en el punto de estudio. El sentido está dado por la **regla de la mano derecha**: con el pulgar de la mano derecha indicando el sentido de la intensidad de corriente, el resto de los dedos indican el sentido del campo magnético.

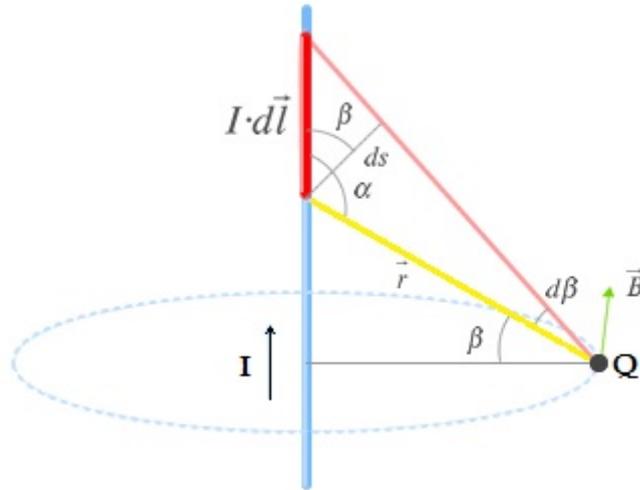


Figura 3.1: Campo magnético generado por un conductor recto

Con esta información, retomando la ecuación 3.1 y observando la figura 3.1, se tiene que el producto vectorial $\vec{dl} \times \hat{u}_r$, correspondiente a la dirección de campo, se encuentra en el eje perpendicular a la hoja, con el sentido que le otorgue la regla de la mano derecha.

Sólo resta el cálculo del módulo, según la ecuación 3.3.

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{dl \cdot \sin \alpha}{r^2} \quad (3.3)$$

De la figura 3.1 es posible obtener la siguientes equivalencias:

- $\sin \alpha = \cos \beta$
- $dl = \frac{ds}{\cos \beta}$
- $ds = r \cdot d\beta$
- $R = r \cdot \cos \beta$

Aplicándolas, con el objetivo de simplificar, resulta:

$$\frac{dl \sin \alpha}{r^2} = \frac{\cos \beta d\beta}{R} \quad (3.4)$$

Considerando el conductor infinito, el ángulo β tiende a $\frac{\pi}{2}$, por lo que de las ecuaciones 3.1 y 3.4 se obtiene:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos \beta d\beta \rightarrow B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \cdot [\sin \beta]_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \rightarrow$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (3.5)$$

Por lo tanto, el valor de la densidad de flujo magnético creado por una corriente rectilínea en un punto Q se calcula por medio de la ecuación 3.5, donde:

- B= Densidad de flujo magnético en el punto Q

- μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío
- I = Intensidad de corriente que circula en línea recta
- R = Distancia más corta desde Q hasta la corriente

3.2. Ley de Ampère

La Ley de Ampère establece que: “La circulación de un campo magnético a lo largo de una línea cerrada es igual al producto de μ_0 por la intensidad neta que atraviesa el área limitada por la trayectoria”. Esto se puede representar mediante la ecuación 3.6

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I \quad (3.6)$$

Donde:

- \vec{B} = Densidad de flujo magnético
- μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío
- $d\vec{l}$ = Diferencial de longitud
- I = Intensidad de corriente

3.3. Ley de Faraday

La Ley de Inducción Electromagnética de Faraday o Ley de Faraday, establece que el voltaje inducido (fuerza electromotriz) en un circuito cerrado es igual a la rapidez con la que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa la superficie definida por dicho circuito.

El flujo magnético se define como la cantidad de líneas de campo magnético que atraviesan una superficie S en el espacio y se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\Phi_B = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (3.7)$$

Donde:

- \vec{B} = Densidad de flujo magnético
- $d\vec{A}$ = Diferencial de superficie

Esto permite expresar el voltaje inducido (f.e.m.), el cual depende estrictamente de la variación de flujo magnético, como:

$$\xi = -\frac{d}{dt}\Phi_B \quad (3.8)$$

El signo negativo de la ecuación 3.8 corresponde a la Ley de Lenz, la cual establece que el sentido de la corriente inducida por la f.e.m. es tal que el campo magnético generado por la misma se opone al campo magnético original.

Asimismo, la f.e.m. inducida se define como la circulación de campo eléctrico a lo largo del contorno C delimitado por la superficie S :

$$\xi = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (3.9)$$

Combinando las ecuaciones 3.8 y 3.9, se obtiene la expresión integral de la Ley de Faraday, tal como se observa en la ecuación 3.10:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (3.10)$$

Donde:

- \vec{E} = Campo eléctrico
- \vec{B} = Densidad de flujo magnético
- $d\vec{A}$ = Diferencial de superficie
- $d\vec{l}$ = Diferencial de longitud

3.4. Hilo de guardia [4]

Se pretende calcular la corriente que circula por el hilo de guardia de una línea aérea. Para ello, se considera una línea trifásica con un conductor de guardia como se muestra en la figura 3.2 y se busca determinar la impedancia de la línea considerando el retorno por tierra.

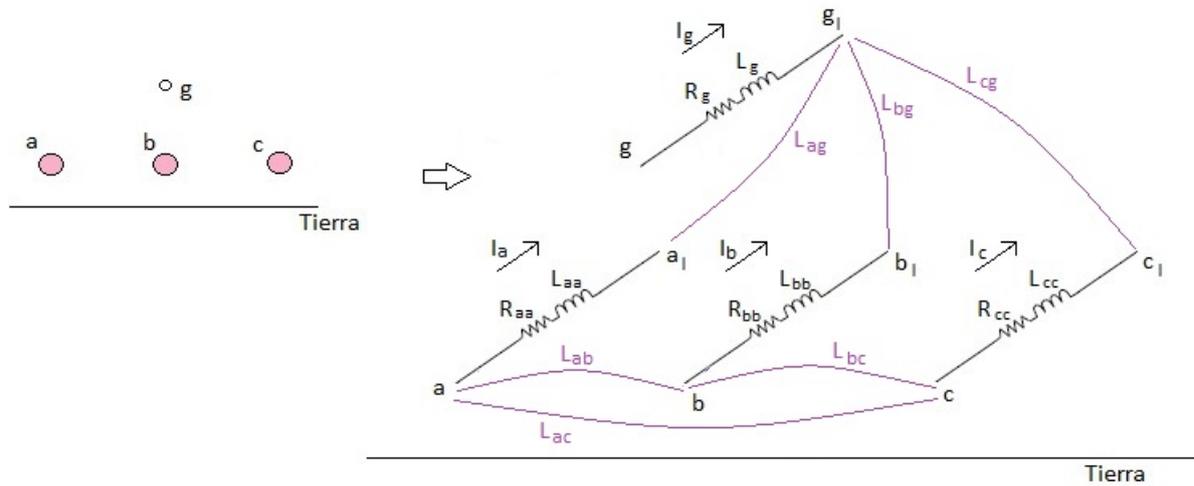


Figura 3.2: Línea trifásica considerada

Se aplica el método propuesto por C. H. Gary (Électricité de France), que consiste en una aproximación en la cual la tierra se representa como un conjunto de conductores ficticios, por los que circula la corriente de retorno por tierra, y que se encuentran “enterrados” a una profundidad compleja.

La profundidad compleja se calcula según la siguiente ecuación:

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu_0}} \quad (3.11)$$

Donde:

- ρ es la resistividad del terreno en $\Omega.m$

3.4. Hilo de guardia [4]

- μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío
- $\omega = 2\pi f$, donde f es la frecuencia industrial (50 Hz)

Se consideran las distancias que se muestran en la figura 3.3.

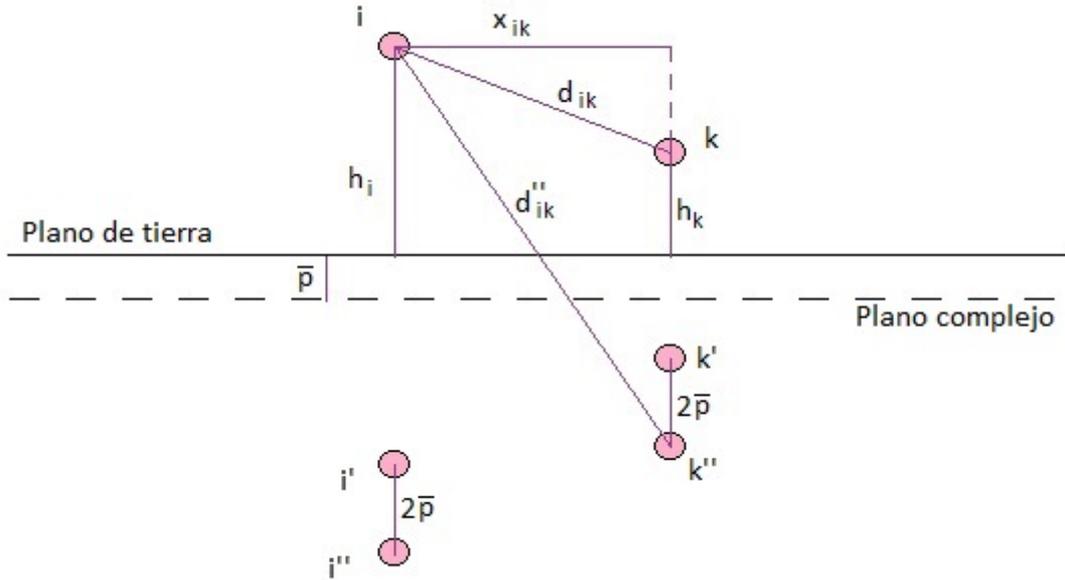


Figura 3.3: Distancias consideradas para el cálculo de la impedancia serie de una línea

La caída de tensión en cada conductor en un tramo de longitud l se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} V_{aa_l} \\ V_{bb_l} \\ V_{cc_l} \\ V_{gg_l} \end{bmatrix} = l \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ag} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bg} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cg} \\ Z_{ga} & Z_{gb} & Z_{gc} & Z_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_g \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Cada elemento de impedancia Z se calcula según el método de profundidad compleja:

$$z_{ii} = R + j \left(\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h_i + \bar{p})}{r_i} \right)$$

$$z_{ik} = j \left(\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{2(h_i + h_k + \bar{p})^2 + x_{ik}^2}}{d_{ik}} \right) = j \left(\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d''_{ik}}{d_{ik}} \right)$$

Donde R es la resistencia del conductor por metro y r_i su radio geométrico.

Dado que el hilo de guardia se encuentra aterrado, se puede reescribir la ecuación 3.12 como:

$$\frac{1}{l} \begin{bmatrix} V_{aa_l} \\ V_{bb_l} \\ V_{cc_l} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ag} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bg} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cg} \\ Z_{ga} & Z_{gb} & Z_{gc} & Z_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_g \end{bmatrix}$$

De esta última ecuación se desprende la corriente por el hilo de guardia:

$$[0] = [Z_{ga} \quad Z_{gb} \quad Z_{gc}] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + [Z_{gg}] [I_g]$$

$$[I_g] = -[Z_{gg}]^{-1} [Z_{ga} \quad Z_{gb} \quad Z_{gc}] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

3.5. Catenaria [5]

Es posible considerar las líneas aéreas como un hilo suspendido en los apoyos de la línea, de manera de obtener un modelo simplificado de la realidad. La forma que describe el hilo en dichas condiciones se conoce como catenaria.

En la mecánica de hilos, los parámetros involucrados son:

- q : Solicitación externa por unidad de longitud del conductor
- T : Esfuerzo de tiro - tangente al conductor, siempre de tracción

Entonces,

$$\vec{T} = T\hat{t}$$

$$\vec{T} = H\hat{i} + V\hat{j}$$

Donde H y V son las componentes horizontal y vertical del esfuerzo de tiro respectivamente, siendo \hat{i}, \hat{j} y \hat{t} los versores del *eje x*, del *eje y* y el versor tangencial respectivamente.

Si el conductor se encuentra únicamente sometido a su propio peso, se cumple que para un tramo diferencial $d\vec{f} = -q ds\hat{j}$, siendo $d\vec{f}$ y ds los definidos en la figura 3.4.

Aplicando la primera ecuación cardinal a un diferencial de hilo en equilibrio (figura 3.4) se obtiene:

$$d\vec{T} + d\vec{f} = 0$$

$$d\vec{T} = dH\hat{i} + dV\hat{j} \rightarrow d\vec{T} = dV\hat{j}$$

$$dH = 0 \rightarrow H = cte.$$

$$dV = q ds$$

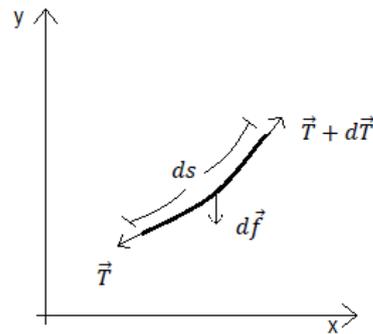


Figura 3.4: Primera ecuación cardinal en un diferencial de hilo

3.5. Catenaria [5]

Se observa que en una línea la componente horizontal del esfuerzo de tiro se mantiene constante. Para una línea tendida entre dos apoyos al mismo nivel, se obtiene:

$$\frac{V}{H} = \frac{dy}{dx}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{q}{H} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

Donde x , y , V y H son los de la figura 3.5

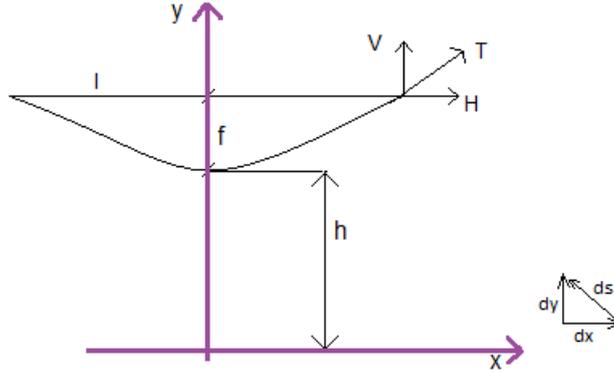


Figura 3.5: Parámetros involucrados en la ecuación de la catenaria

Resolviendo la ecuación diferencial, se deduce la curva teórica del hilo en equilibrio (ecuación de la catenaria):

$$y = \frac{H}{q} \cosh\left(\frac{q}{H}x\right) = h \cosh\left(\frac{x}{h}\right)$$

donde $h = \frac{H}{q}$ se denomina parámetro de la catenaria.

La flecha en el punto medio de la línea puede hallarse mediante la siguiente ecuación:

$$f = h \left(\cosh\left(\frac{l}{2h}\right) - 1 \right)$$

donde l corresponde a la distancia entre los dos apoyos del hilo, la cual se conoce como vano.

La longitud total del conductor se calcula con la siguiente ecuación:

$$l = \int ds = \int \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} . dx = \left[h \sinh\left(\frac{x}{h}\right) \right]_{x_i}^{x_f}$$

Para el cálculo de la componente vertical del tiro (V_x) en cualquier punto del conductor, se considera el peso del tramo desde el vértice de la catenaria al punto considerado:

$$V_x = q l_x = qh \sinh\left(\frac{x}{h}\right)$$

$$T^2 = H^2 + V^2 = h^2 q^2 \left(\cosh\left(\frac{x}{h}\right) \right)^2 \rightarrow T = qy$$

Por lo tanto, a partir del valor conocido del tiro en un punto de la catenaria, se puede obtener el valor en cualquier otro punto como la suma algebraica del peso lineal por la diferencia de cota.

Para el cálculo mecánico de conductores existen tablas (una por cada tipo de conductor), las cuales según el vano y las condiciones de temperatura y viento, devuelven los valores de tensión máxima y flecha.

3.5.1. Aproximación de la catenaria por una parábola

Las fórmulas vistas anteriormente se vuelven engorrosas cuando, por ejemplo, los apoyos de las líneas se encuentran en desnivel, por lo que es usual utilizar aproximaciones de las mismas.

Se considera que un conductor de una línea eléctrica aérea se encuentra tenso cuando se cumple la siguiente relación:

$$\frac{f}{l} < \frac{1}{8} \quad (3.13)$$

Donde:

- f es la flecha del conductor
- l es la longitud del vano

Recordando que $\vec{ds} = \vec{dx} + \vec{dy}$, en estas condiciones se acepta la aproximación $ds \simeq dx$ ($dy \rightarrow 0$) y la fuerza externa sobre el conductor se considera constante según su cuerda:

$$\begin{aligned} dV &= q dx \\ \frac{dy}{dx} &= \frac{V}{H} \\ \frac{dy^2}{dx^2} &= \frac{q}{H} \end{aligned}$$

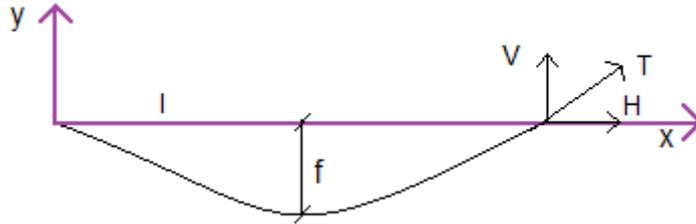


Figura 3.6: Sistema de coordenadas para la aproximación parabólica

Resolviendo la ecuación, según el sistema de coordenadas de la figura 3.6, se obtiene la aproximación parabólica del hilo suspendido:

$$y = \frac{q}{2H}x(x - l) \quad (3.14)$$

3.5.2. Ecuación de catenaria con apoyos en pequeño desnivel

Al existir un desnivel entre los apoyos del vano, la forma que toman los conductores de la línea se ve afectada. Si dicho desnivel es pequeño, se puede utilizar la aproximación parabólica realizada anteriormente para apoyos a nivel, donde $ds \simeq dx$.

La pequeña diferencia de nivel entre los apoyos provoca que el vértice de la parábola se aparte del punto medio del vano, pero quede situado dentro del mismo.

En la figura 3.7 se presenta un esquema de la configuración.

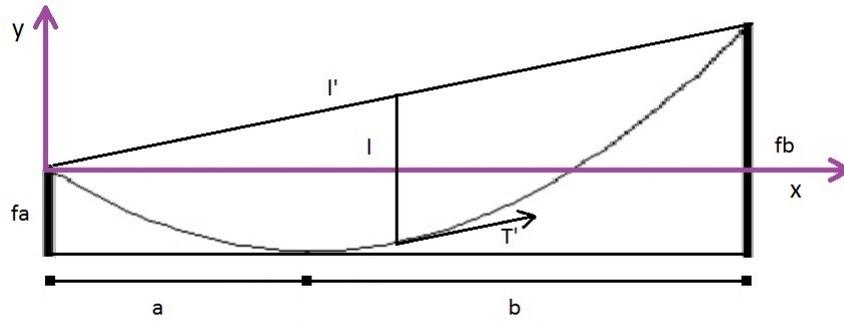


Figura 3.7: Configuración de catenaria con pequeño desnivel

A partir de la ecuación 3.14 se puede determinar la curva que describe el conductor:

$$y = \frac{q}{2H}x(x - 2a) \quad (3.15)$$

Los parámetros H y q son los definidos para catenaria sin desnivel y a surge de aplicar las siguientes ecuaciones:

$$\text{Segunda cardinal en el vértice} \rightarrow \begin{cases} Hf_a = \frac{qa^2}{2} \\ Hf_b = \frac{qb^2}{2} \\ a + b = l \\ d = f_b - f_a \end{cases}$$

Despejando se llega a la siguiente expresión:

$$a = \frac{l}{2} - \frac{Hd}{ql}$$

3.6. Ecuaciones de Maxwell [6]

Para el cálculo del campo magnético se consideran las ecuaciones de Maxwell, las cuales se presentan a continuación:

1. $\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\delta \vec{D}}{\delta t}$
2. $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\delta \vec{B}}{\delta t}$
3. $\nabla \cdot \vec{D} = \rho$
4. $\nabla \cdot \vec{B} = 0$

Donde:

- \vec{H} = Intensidad de campo magnético
- \vec{J} = Densidad de corriente
- \vec{D} = Desplazamiento eléctrico
- \vec{E} = Campo eléctrico

Capítulo 3. Nociones teóricas

- \vec{B} = Densidad de flujo magnético
- ρ = Densidad volumétrica de carga
- ∇ = Operador vectorial diferencial
 - $\nabla \cdot$ = Divergencia: $\nabla \cdot \vec{F}(x, y, z) = \frac{\delta \vec{F}}{\delta x} + \frac{\delta \vec{F}}{\delta y} + \frac{\delta \vec{F}}{\delta z}$
 - $\nabla \times$ = Rotacional: $\nabla \times \vec{F}(x, y, z) = \nabla \times \vec{F} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \frac{\delta}{\delta x} & \frac{\delta}{\delta y} & \frac{\delta}{\delta z} \\ \vec{F}_x & \vec{F}_y & \vec{F}_z \end{vmatrix}$

Particularmente, interesan las ecuaciones 1 y 4.

La primera ecuación representa una generalización de la Ley de Ampere, expresada en función de \vec{H} y \vec{J} . La misma establece que la circulación de un campo magnético (\vec{H}) a lo largo de una curva cerrada, es igual a la densidad de corriente (\vec{J}) sobre la superficie encerrada por la curva.

La ley de Ampere falla en ciertas aplicaciones, por lo que surgió la necesidad de agregar un nuevo término que elimine inconsistencias, denominado “corriente de desplazamiento”. En lo que sigue, se supondrá que dicho término es nulo. Por ejemplo, en el caso de un transformador, es equivalente a despreciar las capacidades del mismo a la frecuencia de funcionamiento.

Por lo tanto, considerando el vacío como medio en el cual se busca calcular el campo ($\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$), la ecuación 1 se transforma en:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (3.16)$$

La cuarta ecuación responde al hecho de que nunca se observaron monopolos magnéticos. Se cumple que las líneas de campo magnético son siempre cerradas, por lo cual al encerrar un dipolo en una superficie cerrada, el flujo magnético no entra ni sale de la misma y el campo no diverge.

Esta ecuación se puede escribir en función del vector \vec{A} , el cual se conoce como Potencial Vector y cumple con la identidad:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{A}) = 0$$

Para ello, se debe expresar \vec{B} como:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (3.17)$$

Combinando las ecuaciones 3.16 y 3.17 se obtiene:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \mu_0 \vec{J} \quad (3.18)$$

La ecuación 3.18 recibe el nombre de Ecuación Vectorial de Poisson.

Entonces, dado \vec{J} es posible calcular \vec{A} utilizando la ecuación 3.18 y luego hallar \vec{B} utilizando la ecuación 3.17.

Ecuación de Laplace - Poisson [13]

Para continuar con el desarrollo de las ecuaciones anteriores, se define un problema en dos dimensiones, con simetría plana y un sistema de coordenadas ($O x y z$) asociado a una base ortonormal ($\hat{i} \hat{j} \hat{k}$).

Se considera una densidad de corriente \vec{J} que cumple:

$$\vec{J}(x, y, z) = J(x, y) \hat{k}$$

Aplicando la ley de Biot-Savart, como se cumple que $d\vec{l}$ es colineal a \vec{J} , se obtiene que \vec{B} pertenece a los planos $z = \text{cte}$ y su módulo es independiente de z .

3.6. Ecuaciones de Maxwell [6]

Por lo tanto, se define:

$$\vec{B}(x, y, z) = B_x(x, y)\hat{i} + B_y(x, y)\hat{j}$$

Como \vec{A} cumple la ecuación 3.17, se puede escribir de la forma:

$$\vec{A}(x, y, z) = A(x, y)\hat{k}$$

Entonces:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \frac{\delta}{\delta x} & \frac{\delta}{\delta y} & \frac{\delta}{\delta z} \\ 0 & 0 & A(x, y) \end{vmatrix} = \frac{\delta A(x, y)}{\delta y} \hat{i} - \frac{\delta A(x, y)}{\delta x} \hat{j} \quad (3.19)$$

Por lo tanto:

$$B_x(x, y) = \frac{\delta A(x, y)}{\delta y} \quad (3.20)$$

$$B_y(x, y) = -\frac{\delta A(x, y)}{\delta x} \quad (3.21)$$

Para determinar \vec{A} , se plantea:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \frac{\delta}{\delta x} & \frac{\delta}{\delta y} & \frac{\delta}{\delta z} \\ \frac{\delta}{\delta x} & -\frac{\delta}{\delta x} & 0 \end{vmatrix} = - \left[\frac{\delta^2 A(x, y)}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 A(x, y)}{\delta y^2} \right] \hat{k} = \mu_0 J(x, y) \hat{k} \quad (3.22)$$

De la última igualdad se desprende la Ecuación de Laplace - Poisson en coordenadas cartesianas:

$$\frac{\delta^2 A(x, y)}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 A(x, y)}{\delta y^2} = -\mu_0 J(x, y) \quad (3.23)$$

Condiciones de borde para los vectores de campo [6]

Para conocer cómo varían los vectores \vec{B} y \vec{H} al atravesar la interfaz entre dos medios en contacto (1 y 2) de diferentes propiedades magnéticas, se considera un elemento cilíndrico de superficie S , el cual corta la interfaz y tiene una altura despreciable en relación al diámetros de sus bases (figura 3.8).

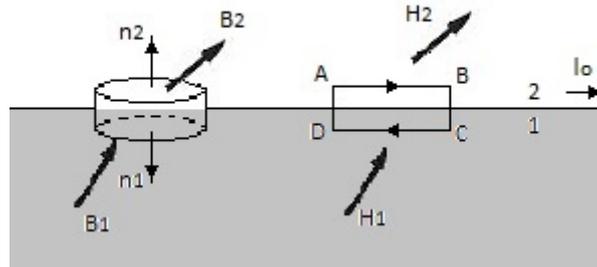


Figura 3.8: Condiciones de borde de \vec{B} y \vec{H}

Se aplica en la superficie S la cuarta ecuación de Maxwell en su forma integral, la cual establece que el flujo magnético por cualquier superficie cerrada es nulo:

$$\oint_S \vec{B} \cdot \vec{n} da = 0$$

Por lo tanto:

$$\vec{B}_2 \cdot \vec{n}_2 \Delta S + \vec{B}_1 \cdot \vec{n}_1 \Delta S = 0$$

donde \vec{n}_1 y \vec{n}_2 son los vectores normales salientes a las bases del elemento cilíndrico, por lo que se cumple que $\vec{n}_2 = -\vec{n}_1$

Entonces:

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n}_2 = 0 \quad (3.24)$$

De la ecuación 3.24 se desprende que la componente normal de \vec{B} es continua al atravesar la interfaz.

Para conocer la variación del campo \vec{H} , se considera la trayectoria cerrada A-B-C-D de la figura 3.8, sobre la cual se aplica la formulación integral de la Ley de Ampere:

$$\int_S \nabla \times \vec{H} \cdot \vec{n} da = \int_S \vec{J} \cdot \vec{n} da$$

Por lo tanto:

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \cdot \vec{l}_0 = \vec{J} \cdot (\vec{n}_2 \times \vec{l}_0) = \vec{J} \times \vec{n}_2 \cdot \vec{l}_0 \quad (3.25)$$

Donde \vec{J} es la densidad de corriente superficial y \vec{l}_0 es el vector unitario que se muestra en la figura 3.8.

En la ecuación 3.25 se desprecian los segmentos A-D y B-C, por ser los mismos de longitud mucho menor a los segmentos AB y CD. Esta ecuación implica que, ante ausencia de corriente superficial, la componente tangencial de \vec{H} es continua al atravesar la interfaz.

Si se realiza el producto vectorial de la ecuación 3.25 por \vec{n}_2 , ésta se puede escribir como:

$$\vec{n}_2 \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{J} \quad (3.26)$$

3.6.1. Método de Elementos Finitos

Junto a las ecuaciones de Maxwell, las cuales se plantean como ecuaciones en derivadas parciales, surgen distintas técnicas y métodos de cálculo para su resolución. En un comienzo se desarrollaron técnicas analíticas, de gran complejidad matemática. Las mismas alcanzaban soluciones exactas pero estaban limitadas en su aplicación, ya que requerían que el problema a resolver tuviera una geometría simple. En la actualidad, se utilizan técnicas numéricas, cuyo desarrollo fue favorecido por el aumento de la capacidad de cálculo y procesamiento computacional.

Como se mencionó anteriormente, con las técnicas analíticas se logran resultados exactos. En cambio, con las técnicas numéricas, debido a la dificultad que puede presentarse al resolver ecuaciones en derivadas parciales, se encuentran soluciones aproximadas.

El Método de los Elementos Finitos es el más utilizado para la resolución de problemas magneto-estáticos. Su popularidad se debe a que puede trabajar con geometrías complejas, aplicando una formulación sencilla y obteniendo resultados precisos. Resolver un problema utilizando el Método de Elementos Finitos se traduce a resolver un sistema algebraico lineal, generalmente de órdenes elevados.

Primero es necesario definir un dominio del problema, el cual va a corresponder al espacio físico que ocupa el proceso cuyo modelo matemático se quiere resolver. Dicho dominio se divide en una malla, donde cada elemento de la misma se conoce como “elemento finito”. En el caso de problemas bidimensionales, se elige como elemento el triángulo, por ser la forma geométrica más básica.

Para cada componente de la malla se plantea un polinomio que aproxima la solución. Luego, mediante la resolución de un sistema de ecuaciones, se encuentra el valor de los coeficientes de cada polinomio, encontrando una solución aproximada para cada elemento finito. A su vez, cada polinomio

3.6. Ecuaciones de Maxwell [6]

relaciona la solución del elemento finito particular con la de los adyacentes, por lo cual se obtienen aproximaciones polinomiales por sectores en todo el dominio.

Existen distintos métodos para aproximar la solución del sistema de ecuaciones algebraico planteado, dentro de los cuales se destacan los métodos variacionales y los métodos residuales.

En los métodos variacionales, es necesario conocer el funcional del problema que se quiere resolver, ya que dichos métodos buscan minimizar el valor del funcional con respecto al valor de la variable del problema, en cada uno de los nodos de la malla. Su principal desventaja es la dificultad de encontrar, en algunos casos, el funcional, incluso la inexistencia del mismo para ciertos problemas.

Los métodos residuales se basan en el hecho que, al no conocer la solución exacta del problema que se quiere resolver, se sustituye una solución aproximada en la ecuación diferencial que define el problema y se obtiene un error residual. Estos métodos buscan forzar el valor del residuo a cero, multiplicando el error residual por una “función de peso” e integrándolo en el dominio.

Aplicación a problemas bidimensionales [14]

Como se mencionó anteriormente, en el caso de problemas bidimensionales se elige al triángulo como elemento finito por ser la geometría más simple, pero es posible elegir otras geometrías para formar la malla.

El potencial vector puede ser aproximado por un desarrollo similar a una serie de Taylor. Para un elemento de n vértices, tendría la siguiente forma:

$$A(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + ..$$

Al elegir el triángulo, n vale 3 y el potencial varía linealmente dentro del mismo. Entonces;

$$A(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y \tag{3.27}$$

Aplicando la ecuación 3.27 a cada vértice del triángulo, se obtiene:

$$\begin{aligned} A_1 &= a_1 + a_2x_1 + a_3y_1 \\ A_2 &= a_1 + a_2x_2 + a_3y_2 \\ A_3 &= a_1 + a_2x_3 + a_3y_3 \end{aligned}$$

Para calcular los coeficientes de los polinomios, se debe plantear el siguiente sistema de ecuaciones:

$$a_1 = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} A_1 & x_1 & y_1 \\ A_2 & x_2 & y_2 \\ A_3 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad a_2 = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} 1 & A_1 & y_1 \\ 1 & A_2 & y_2 \\ 1 & A_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad a_3 = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & A_1 \\ 1 & x_2 & A_2 \\ 1 & x_3 & A_3 \end{vmatrix} \quad D = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}$$

Por lo tanto, la ecuación 3.27 se puede escribir de la siguiente forma:

$$A(x, y) = \frac{1}{D} \{ [A_1(x_2y_3 - x_3y_2) + A_2(x_3y_1 - x_1y_3) + A_3(x_1y_2 - x_2y_1)] + [A_1(y_2 - y_3) + A_2(y_3 - y_1) + A_3(y_1 - y_2)].x + [A_1(x_3 - x_2) + A_2(x_1 - x_3) + A_3(x_2 - x_1)].y \} \tag{3.28}$$

Es posible expresar la ecuación 3.28 como:

$$A(x, y) = \Phi_1(x, y)A_1 + \Phi_2(x, y)A_2 + \Phi_3(x, y)A_3 \tag{3.29}$$

Donde:

$$\Phi_1(x, y) = \frac{1}{D} [x_2y_3 - x_3y_2] + (y_2 - y_3).x + (x_3 - x_2).y$$

Capítulo 3. Nociones teóricas

$$\Phi_2(x, y) = \frac{1}{D} [(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1).x + (x_1 - x_3).y]$$

$$\Phi_3(x, y) = \frac{1}{D} [(x_1y_2 - x_2y_1) + (y_1 - y_2).x + (x_2 - x_1).y]$$

Método variacional [15]

Para aplicar el método variacional, es necesario saber el funcional del problema, el cual se busca minimizar. Para ello, se debe conocer la función de energía electromagnética.

La densidad de energía en un volumen del espacio está relacionada con la divergencia del vector de Poynting:

$$\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{H} \cdot \nabla \times \vec{E} - \vec{E} \cdot \nabla \times \vec{H} \quad (3.30)$$

Donde:

- \vec{H} es el campo magnético originado por la corriente que ingresa al volumen del espacio considerado.
- \vec{E} es el campo eléctrico originado por la variación del campo magnético \vec{H}

Considerando la primera y la segunda ecuación de Maxwell, y tomando \vec{J} como la suma de la densidad de corriente que ingresa al volumen con la densidad de corriente inducida en el material, se puede reescribir la ecuación 3.30 como:

$$\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = - \left(\vec{H} \frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \right) - \vec{J} \vec{E} \quad (3.31)$$

Si se considera el elemento de volumen como un cilindro, la integral de la ecuación 3.31 en el volumen es:

$$\iiint_V \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) dV + \iiint_V \left(\vec{H} \frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \right) dV + \iiint_V (\vec{J} \vec{E}) dV = 0 \quad (3.32)$$

La ecuación 3.32 indica la energía almacenada en el volumen considerado, donde:

- El primer término corresponde a la energía que entra o sale del volumen. Si se considera que la corriente que ingresa al volumen lo hace de forma perpendicular a las bases del cilindro, entonces \vec{H} tiene dirección tangencial y \vec{E} tiene dirección radial. Por lo tanto, el producto vectorial tiene dirección axial y el primer término es nulo.
- El segundo término corresponde a la variación en el tiempo de la energía magnética en el volumen, dado que $\delta \iiint_V \left(\int_0^B \vec{H} \cdot d\vec{B} \right) dV = \delta W_{mag}$
- El tercer término corresponde a la variación de la energía eléctrica en el tiempo (potencia eléctrica):

$$P_e = \iiint \vec{E} \vec{J} dV$$

que utilizando la segunda ecuación de Maxwell se puede escribir como:

$$P_e = - \iiint \frac{\delta \vec{A}}{\delta t} \vec{J} dV = \frac{\delta}{\delta t} \iiint \left(\int_0^A \vec{J} d\vec{A} \right) dV$$

y por lo tanto la energía eléctrica en el volumen es:

$$W_e = - \iiint \left(\int_0^A \vec{J} d\vec{A} \right) dV$$

3.6. Ecuaciones de Maxwell [6]

Según la ecuación 3.32, dado que el primer término de la misma es nulo, la suma de la variación en el tiempo de la energía magnética y la energía eléctrica en el volumen es cero. Como la potencia es la derivada de la energía, si la potencia total es nula, la energía es mínima. Por lo tanto, el método variacional buscará encontrar los valores de campo eléctrico y magnético que minimicen la energía.

El funcional puede escribirse según el potencial vector y la densidad de corriente, como se muestra en la ecuación 3.33:

$$F = \iint_S \left[\frac{1}{2\mu} \left(\frac{\delta \vec{A}}{\delta x} \right)^2 + \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\delta \vec{A}}{\delta y} \right)^2 - J_{libre}^{\vec{}} \cdot \vec{A} \right] ds \quad (3.33)$$

Donde se utilizaron las siguientes ecuaciones:

- $\vec{B} = \mu \vec{H}$
- $\vec{B} = \frac{\delta \vec{A}}{\delta x} \hat{i} + \frac{\delta \vec{A}}{\delta y} \hat{j}$

Para resolver el problema, el método variacional busca minimizar el funcional de la ecuación 3.33, de forma tal de conocer el potencial vector en los nodos de los triángulos que forman la malla. Esto se traduce en que la derivada del funcional con respecto al potencial vector debe ser nula.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 4

Líneas

Uno de los principales objetivos del proyecto es el estudio de los campos magnéticos generados por líneas aéreas rurales de Media Tensión. Para ello, se parte de un modelo simplificado de la línea, el cual se va aumentando en complejidad según se requiera. Seguidamente se realizan distintas validaciones, de forma de avalar el modelo elegido.

4.1. Descripción del modelo

Como primera aproximación se considera una línea trifásica, rectilínea e infinita. Se busca simular el valor RMS de la densidad de flujo magnético generada por la corriente que circula por la línea, a un metro de altura del suelo y en un plano perpendicular a la misma.

Para ello se aplica la Ley de Biot-Savart ¹.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi|\vec{r}|} (\vec{I} \times \hat{u})$$

Donde:

- I = Intensidad de corriente eléctrica que circula por el conductor
- \vec{r} = Vector distancia desde el conductor al punto de aplicación
- μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío
- $\hat{u} = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$

Al sumar vectorialmente la contribución de cada fase se tiene la densidad de flujo magnético total inducida por la terna. Para el caso de una doble terna, el procedimiento es análogo, se suman los campos inducidos por cada una de las seis fases, obteniéndose la densidad de flujo total.

Para corrientes sinusoidales, tanto la densidad de flujo magnético como sus componentes B_x , B_y y B_z son sinusoidales.

En el caso de una terna trifásica, donde la corriente por cada conductor tiene una fase diferente, se genera un campo rotacional.

El valor RMS de la densidad de flujo magnético se puede calcular como la media cuadrática de los valores RMS de las componentes sinusoidales B_x , B_y y B_z :

$$B_{RMS} = \sqrt{B_{x\ RMS}^2 + B_{y\ RMS}^2 + B_{z\ RMS}^2}$$

¹Capítulo 3, Sección 3.1

Capítulo 4. Líneas

Las componentes RMS se calculan según la siguiente ecuación:

$$B_{i\text{ RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T B_i^2 dt}$$

donde B_i^2 es el cuadrado del valor de la densidad de flujo magnético, calculada según la ecuación 4.1, en un punto dado y para la corriente correspondiente al instante t , con $t \in [0, T]$, donde T es el período de la senoide de corriente.

Al no disponerse de publicaciones con las cuales validar los campo inducidos por líneas de Media Tensión, en el algoritmo se agrega el hilo de guardia, existente en configuraciones de Alta Tensión.

El modelado del hilo de guardia se basa en una aproximación propuesta por C. H. Gary², con la que se obtiene la corriente que circula por el mismo, permitiendo así, calcular su contribución a la densidad de flujo total.

Realizando una aproximación más realista, se deja de suponer la línea recta e infinita, considerando el largo del vano y la forma del conductor como una catenaria³.

A partir de la ecuación diferencial de Biot-Savart⁴, mediante la suma de los aportes de cada elemento diferencial se logra obtener la densidad de flujo magnético resultante en el punto de estudio.

Nuevamente, se calcula el valor RMS como se explicó anteriormente, donde B_i^2 es el cuadrado del valor de la densidad de flujo magnético, calculada según la suma de la ecuación 4.1 para todos los elementos diferenciales del conductor, en un punto dado y para la corriente correspondiente al instante t .

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi|\vec{r}|^2} (d\vec{l} \times \hat{u}) \quad (4.1)$$

Donde:

- I = Intensidad de corriente eléctrica
- \vec{r} = Vector distancia desde el conductor al punto de aplicación
- μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío
- $\hat{u} = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$
- $d\vec{l}$ = Elemento infinitesimal de longitud del conductor recorrido por la corriente I

²Capítulo 3, Sección 3.4

³Capítulo 3, Sección 3.5

⁴Capítulo 3, Sección 3.1

4.2. Validación con publicaciones

En esta sección se corrobora el correcto funcionamiento del algoritmo desarrollado, que calcula el módulo de la densidad de flujo magnético generada por corrientes circulando por líneas de Alta Tensión. Para ello se contrastan resultados obtenidos mediante simulaciones del programa CEDIMET, con datos extraídos de diferentes publicaciones.

Se consideran líneas de Alta Tensión, ya que no se encontraron publicaciones con resultados para líneas de Media Tensión. Dado que la densidad de flujo magnético generado por una línea no depende del voltaje de la misma, estas publicaciones resultan apropiadas.

4.2.1. Campos Electromagnéticos inducidos por dos ternas de transmisión [7]

Objetivo

Simular la densidad de flujo magnético bajo una doble terna de dimensiones, corriente y frecuencia conocidas, y comparar los resultados en puntos específicos con los obtenidos a partir de mediciones.

Descripción del caso

El modelo consiste en dos ternas ubicadas en forma simétrica a los lados de una columna, donde la posición de cada fase se encuentra en la tabla 4.1.

Fase	x (m)	y (m)
R	-3	16,2
S	-3	13,2
T	-3	10,2
R'	3	16,2
S'	3	13,2
T'	3	10,2

Tabla 4.1: Posiciones de las fases

En la figura 4.1 se encuentra una representación gráfica de la configuración.

Las fases R , S y T conducen una corriente de 650 A , a una frecuencia de 50 Hz y con un desfase de 0° , -120° y 120° respectivamente. Las corrientes para la terna R' , S' y T' son análogas.

Se cuenta con las medidas del valor RMS de la densidad de flujo magnético a 1 metro del piso y con 5 metros de separación entre las mismas, en un plano perpendicular a los conductores de las ternas.

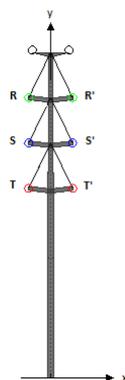


Figura 4.1: Configuración de la doble terna

Comparación entre valores reales y simulados

Dada la incertidumbre respecto a las características físicas de los cables que conforman la doble terna, así como de la longitud del vano, se supondrán los conductores dispuestos en una recta horizontal e infinita.

En la tabla 4.2, se exponen los resultados obtenidos a partir de la simulación con el programa CEDIMET relevantes para la comparación, es decir, el módulo de las densidades de flujo magnético en las posiciones medidas.

Resultados				
	Medidos		Simulados	
Distancia (m)	B(μ T)	B(μ T)	Desviación	Error relativo (%)
30	1,3	1,4	0,1	7,7
25	1,8	1,8	0,0	0,0
20	2,5	2,5	0,0	0,0
15	3,5	3,7	0,2	5,7
10	5,1	5,5	0,4	7,8
5	6,6	7,2	0,6	9,1
0	7,3	8,0	0,7	9,6
-5	6,8	7,2	0,4	5,9
-10	5,4	5,5	0,1	1,9
-15	3,9	3,7	0,2	5,1
-20	2,6	2,5	0,1	3,8
-25	1,9	1,8	0,1	5,3
-30	1,4	1,4	0,0	0,0

Tabla 4.2: Valores medidos y valores simulados con CEDIMET

Se halla el valor absoluto de las desviaciones obteniéndose un máximo de $0,7 \mu T$ y un error relativo con respecto al valor de la medición de $9,6 \%$.

Mediante una aproximación de los valores medidos a través de un polinomio de octavo grado, es posible hallar el punto donde se da el máximo, y con éste el eje de simetría. Se encuentra una diferencia con el simulado, el cual coincide con la columna.

4.2. Validación con publicaciones

Error máximo (%) =	9,6
Desviación máxima (μT)=	0,7
Distancia a la cual se encuentra el máximo en los valores medidos (m):	-0,3
Distancia a la cual se encuentra el máximo en los valores simulados (m):	0

Tabla 4.3: Desviación máxima de valores y eje de simetría

En la figura 4.2 se comparan los valores medidos con los simulados por el programa CEDIMET y se muestra la aproximación de octavo grado realizada.

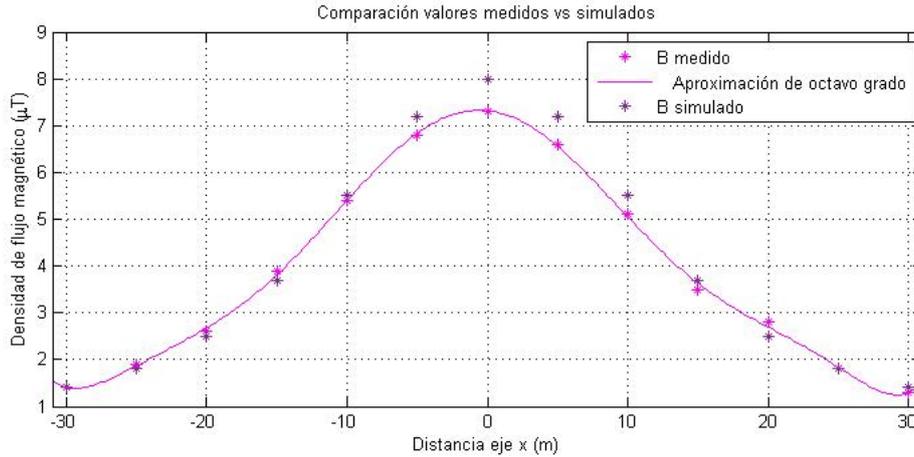


Figura 4.2: Comparación valores medidos vs simulados

Conclusiones

Debido a que no se tienen más datos de la descripción del caso, no es posible utilizar un modelo más representativo.

4.2.2. Impacto de la transposición de fases [8]

Objetivo

Simular la densidad de flujo magnético generado por dos ternas de Alta Tensión, cuyos conductores son rectos e infinitos, para diferentes arreglos de los mismos (uno, dos y tres niveles) y comparar los resultados con los publicados.

También se estudia el impacto que tiene sobre el módulo de la densidad de flujo magnético el intercambio de fases de las corrientes que circulan por las ternas.

Descripción

La posición relativa entre los conductores y la distancia donde se desea medir la densidad de flujo magnético, introducen variaciones en los resultados obtenidos, por lo que en la figura 4.3 se presentan las configuraciones elegidas por la publicación.

Las posiciones de los conductores son representadas por (P1, P2, P3) para una terna, así como (P1', P2', P3') para la otra, mientras que E representa la posición del hilo de guardia.

Capítulo 4. Líneas

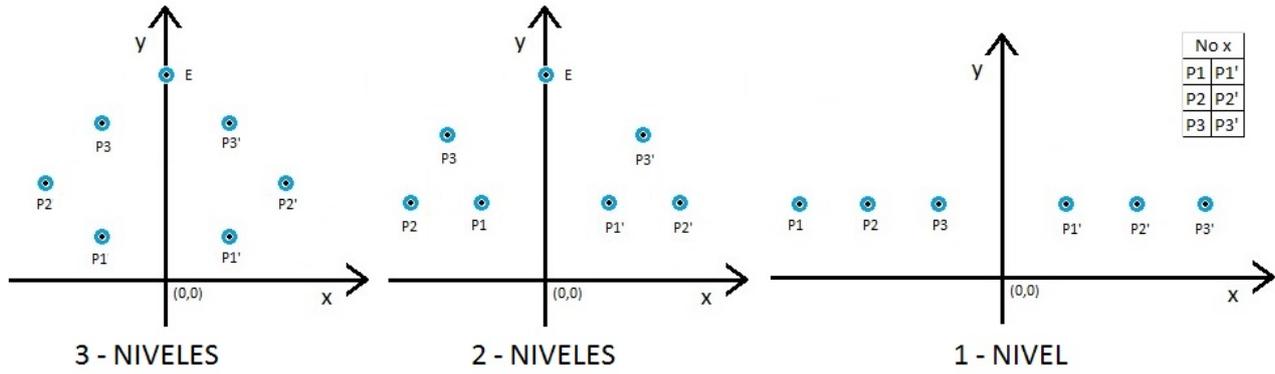


Figura 4.3: Disposición geométrica de las líneas aéreas

Las coordenadas de los conductores para cada configuración se presentan en la tabla 4.4.

	P						P'						E	
	P1		P2		P3		P1'		P2'		P3'		x(m)	y(m)
3-Niveles	-8,5	10,0	-11,5	18,0	-7,5	27,5	8,5	10,0	11,5	18,0	11,5	18,0	0,0	39,0
2-Niveles	-7,5	10,0	-13,0	10,0	-10,0	19,0	7,5	10,0	13,0	10,0	13,0	10,0	0,0	35,5
1-Nivel	-7,5	10,0	-13,0	10,0	-21,0	10,0	7,5	10,0	13,0	10,0	13,0	10,0	-	-

Tabla 4.4: Coordenadas para cada terna

Para una configuración de doble terna, existen 36 posibilidades diferentes para la asignación de fases (F1, F2, F3, F1', F2', F3') para una distribución geométrica de los conductores dada (P1, P2, P3, P1', P2', P3'). Esto se muestra en la tabla 4.5.

A su vez, estas combinaciones resultan en 12 configuraciones de campo diferentes, ya que las variantes 1, 2 y 3 surgen de intercambiar cíclicamente las fases y, por lo tanto, generan el mismo campo magnético.

4.2. Validación con publicaciones

	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5	N° 6
Variable 1	F3 F3'	F2 F3'	F3 F2'	F1 F1'	F3 F2'	F3 F2'
	F2 F2'	F3 F2'	F1 F1'	F2 F3'	F2 F1'	F1 F3'
	F1 F1'	F1 F1'	F2 F3'	F3 F2'	F1 F3'	F2 F1'
Variable 2	F1 F1'	F3 F1'	F1 F3'	F2 F2'	F1 F3'	F1 F3'
	F3 F3'	F1 F3'	F2 F2'	F3 F1'	F3 F2'	F2 F1'
	F2 F2'	F2 F2'	F3 F1'	F1 F3'	F2 F1'	F3 F2'
Variable 3	F2 F2'	F1 F2'	F2 F1'	F3 F3'	F2 F1'	F2 F1'
	F1 F1'	F2 F1'	F3 F3'	F1 F2'	F1 F3'	F3 F2'
	F3 F3'	F3 F3'	F1 F2'	F2 F1'	F3 F2'	F1 F3'
	N° 7	N° 8	N° 9	N° 10	N° 11	N° 12
Variable 1	F2 F2'	F3 F2'	F2 F3'	F1 F1'	F2 F3'	F2 F3'
	F3 F3'	F2 F3'	F1 F1'	F3 F2'	F3 F1'	F1 F2'
	F1 F1'	F1 F1'	F3 F2'	F2 F3'	F1 F2'	F3 F1'
Variable 2	F1 F1'	F2 F1'	F1 F2'	F3 F3'	F1 F2'	F1 F2'
	F2 F2'	F1 F2'	F3 F3'	F2 F2'	F2 F3'	F3 F1'
	F3 F3'	F3 F3'	F2 F1'	F1 F2'	F3 F1'	F2 F3'
Variable 3	F3 F3'	F1 F3'	F3 F1'	F2 F2'	F3 F1'	F3 F1'
	F1 F1'	F3 F1'	F2 F2'	F1 F3'	F1 F2'	F2 F3'
	F2 F2'	F2 F2'	F1 F3'	F3 F1'	F2 F3'	F1 F2'

Tabla 4.5: 12 casos y sus tres variantes para la asignación de fases en una doble terna

Se calcula la densidad de flujo magnético para los 12 casos de cada una de las configuraciones de la figura 4.3, a una altura de un metro del suelo. Los parámetros de las líneas se encuentran en la tabla 4.6.

Voltaje:	420	kV
Corriente:	2300	A
Frecuencia:	50	Hz
Resistividad del suelo	100	Ωm
Sección hilo de guardia	35,5	mm^2

Tabla 4.6: Parámetros de entrada

Se toma como hipótesis que los conductores son rectos e infinitos, y que no hay otra influencia que los campos generados por las corrientes que recorren los mismos.

Resultados

En las figuras 4.4(a), 4.5(a) y 4.6(a) se presentan las simulaciones realizadas con el algoritmo CEDIMET y en 4.4(b), 4.5(b) y 4.6 (b) las simulaciones presentadas en la publicación.

Para el desarrollo del algoritmo CEDIMET utilizado, se emplea la Ley de Biot-Savart⁵, el principio de superposición y, donde corresponda, la aproximación de C.H. Gary⁶.

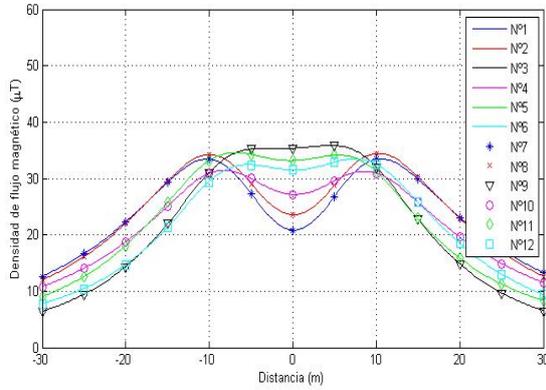
⁵Capítulo 3, Sección 3.1

⁶Capítulo 3, Sección 3.4

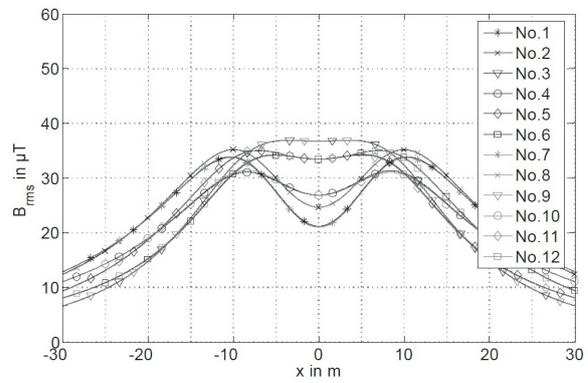
Capítulo 4. Líneas

En cada una de las figuras se encuentran los valores de densidad de flujo magnético generados por los 12 casos mencionados en la tabla 4.5, considerando la variante 1, para cada una de las configuraciones de la figura 4.3.

Se observa que en todos los casos y para todas las configuraciones, las curvas de densidad de flujo magnético obtenidas con el programa CEDIMET se corresponden con las extraídas de la publicación.

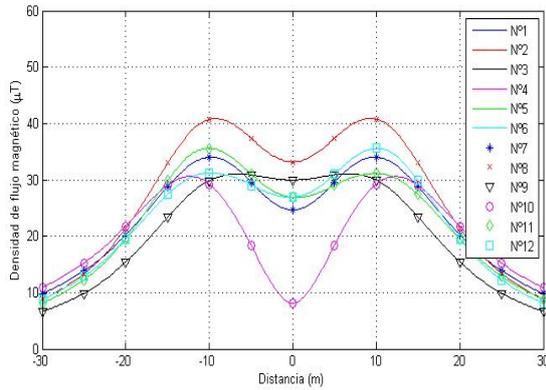


(a) Simulación realizada por el programa CEDIMET

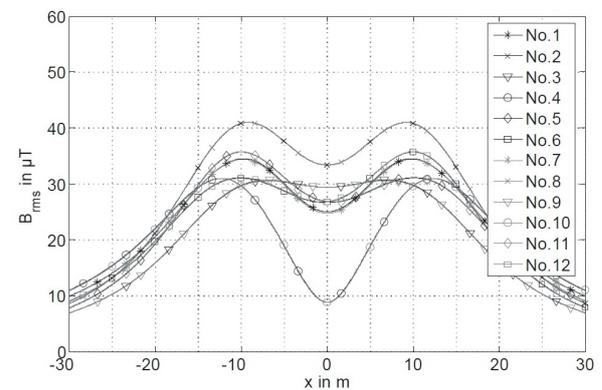


(b) Simulación extraída de la publicación

Figura 4.4: 3 Niveles



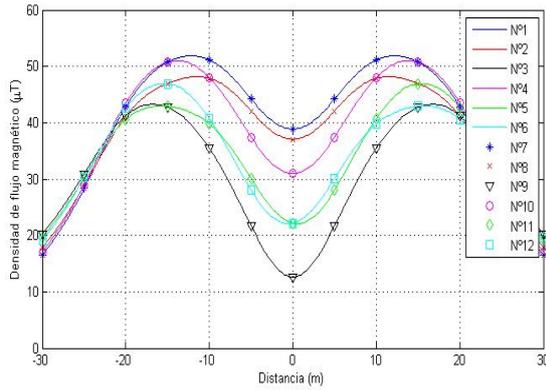
(a) Simulación realizada por el programa CEDIMET



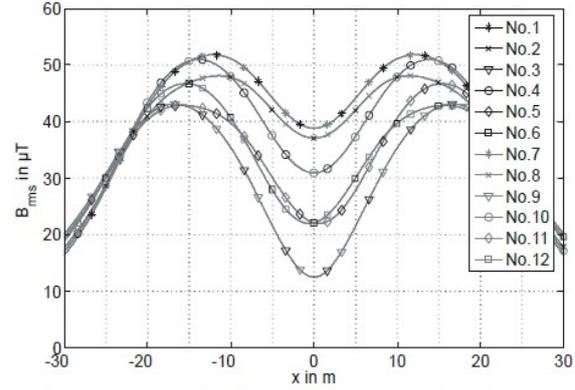
(b) Simulación extraída de la publicación

Figura 4.5: 2 Niveles

4.2. Validación con publicaciones



(a) Simulación realizada por el programa CEDIMET



(b) Simulación extraída de la publicación

Figura 4.6: 1 Nivel

Para la configuración de 3 niveles, en la publicación se destaca que, al elegir una disposición de las fases que genere una baja densidad de flujo magnético directamente debajo de los conductores, valores más altos se presentan en distancias más alejadas.

Además, si se amplían las gráficas, es posible observar que, los casos del 1 al 6 son muy similares a los casos del 7 al 12 respectivamente. La única diferencia entre éstos es que las fases F2 y F3 están intercambiadas, y la pequeña desviación entre sus gráficos se debe a la contribución al campo total de la corriente por el hilo de guardia.

Para la configuración de dos niveles, se menciona que los casos que dan el menor pico de densidad de flujo magnético bajo las líneas, son los mismos que causan los valores más bajos en distancias más alejadas.

La tabla 4.7 permite visualizar, para cada una de las configuraciones, el pico de mayor y menor magnitud de densidad de flujo magnético de los 12 casos considerados. Además, se presentan los resultados correspondientes obtenidos por el programa CEDIMET, y los errores relativos y absolutos entre ambos resultados.

	Valores de la publicación		Valores del programa CEDIMET		Error		
	Caso	Máximo	Caso	Máximo	Absoluto	Relativo	
		B_{RMS} μT		B_{RMS} μT			B_{RMS} μT
3-Niveles	Mejor caso	4/10	31,30	4/10	31,42	0,12	0,39
	Peor caso	3/9	36,90	3/9	35,87	1,03	2,88
	Diferencia	-	5,6	-	4,4	-	-
2-Niveles	Mejor caso	3/9	30,80	3/9	31,10	0,30	0,95
	Peor caso	2/8	41,00	2/8	40,88	0,12	0,30
	Diferencia	-	10,2	-	9,8	-	-
1-Nivel	Mejor caso	3/9	43,10	3/9	43,24	0,14	0,33
	Peor caso	1/7	51,80	1/7	51,89	0,09	0,17
	Diferencia	-	8,7	-	8,6	-	-

Tabla 4.7: Resultados extraídos de la publicación vs resultados simulados por CEDIMET

Conclusiones

Como se puede encontrar en la tabla 4.7 los errores relativos no superan un 3%.

Por otro lado, si se observan todas las simulaciones, se puede visualizar la variabilidad que presenta el hecho de intercambiar el orden de las fases de las corrientes, donde los campos en un mismo nivel

pueden llegar a presentar variaciones mayores a los $10 \mu T$.

Asimismo, de la tabla 4.7 se puede concluir que el arreglo en un nivel es el que presenta mayor valor de densidad de flujo magnético sin importar el orden de las fases de la corriente, lo cual demuestra la dependencia existente entre el valor de flujo y la geometría de la línea.

4.2.3. Campos Electromagnéticos bajo una Línea de Trasmisión y corrientes inducidas en una cerca [9]

Objetivo

Calcular el voltaje y la corriente inducida en una cerca ubicada bajo una línea de trasmisión de tres fases. Esto se realiza con el propósito de comparar los resultados con los obtenidos en el estudio propuesto y resuelto por SES Software (Safe Engineering Services & technologies ltd.), particularmente con el programa HIFREQ.

Este estudio interesa por el cálculo del voltaje inducido, por lo que se utiliza un modelo simplificado del problema y, en consecuencia, la existencia de un rango de error.

Descripción

El problema modelado consiste en una línea de trasmisión de 3 fases y $525 kV$, la cual conduce una corriente de $430 A$. Las tres fases se encuentran a una altura de $20 m$ con el arreglo que se muestra en la figura 4.7.

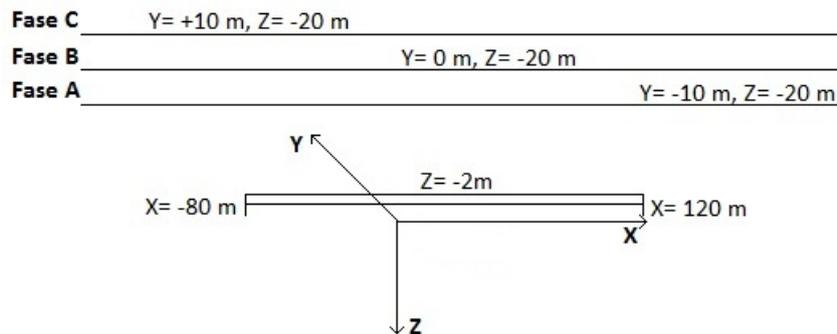


Figura 4.7: Configuración de la línea de trasmisión y la cerca

En el medio de la línea y paralela a la misma se sitúa una cerca de $200 m$ de longitud. Para la cerca se considera un modelo sencillo, consistente en un único lazo de conductor con dos postes, como se muestra en la figura 4.7. La cerca tiene una altura de $2 m$ y sus postes están enterrados a una profundidad de $0,5 m$.

Los conductores de la cerca son tubos de acero con un radio interno de $1 cm$ y un radio externo de $2 cm$. El acero tiene una resistividad relativa de 12 con respecto al cobre recocido y una permeabilidad relativa de 250 respecto al vacío. Los conductores de la cerca están cubiertos con una capa de $0,5 mm$ de material aislante con una resistividad de $10,000 \Omega m$.

Se asume un suelo uniforme de $100 \Omega m$ de resistividad, y de permeabilidad y permitividad relativas unitarias.

Se desea calcular los valores de voltaje y corriente inducidos en la cerca de la figura 4.7. Se asume que la línea de trasmisión es recta a lo largo de una distancia considerable a ambos lados de la cerca.

Resultados

SES Software

El programa HIFREQ de SES Software obtuvo 0,14 A de corriente eficaz inducida en la cerca.

Programa CEDIMET

El programa desarrollado calcula el voltaje inducido en la cerca, para luego proceder al cálculo de la corriente inducida.

Se aplica la ley de Faraday ⁷, la cual establece que el voltaje inducido en la cerca, es directamente proporcional a la rapidez con la que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa la superficie definida por la misma.

Por lo tanto, se calcula el flujo magnético como la derivada de la densidad de flujo magnético en cada diferencial de área perteneciente al área definida por la cerca.

Sumando los diferenciales de flujo, se encuentra que el voltaje inducido es de 0,0155 V.

La corriente inducida en la cerca se calcula según la Ley de Ohm:

$$I_{inducida_{pico}} = \frac{V_{inducido}}{R_{cerca}}$$

Donde R_{cerca} es la resistencia de la cerca, la cual se calcula como:

$$R_{cerca} = \frac{\rho_{rel}}{\rho_{cobre}} \frac{L}{\pi r^2}, \text{ donde:}$$

- $\rho_{rel} = 12$: Resistividad relativa del acero con respecto al cobre recocido.
- $\rho_{cobre} = \frac{1}{56} \Omega m$: Resistividad del cobre recocido.
- $L = 402 m$: Largo total del conductor de la cerca
- $r = 20 mm$: Radio externo

Se obtiene $R_{cerca} = 0,0686 \Omega$ e $I_{inducida_{pico}} = 0,2257 A$. Dicho valor corresponde a la corriente de pico, el valor eficaz es:

$$I_{inducida_{eficaz}} = \frac{I_{inducida_{pico}}}{\sqrt{2}} = 0,1597 A$$

Comparación de resultados

Según el programa HIFREQ de SES Software, la corriente inducida en la cerca para el caso propuesto vale $I_{inducida_{eficaz}} = 0,14 A$, mientras que para el programa CEDIMET se obtuvo $I_{inducida_{eficaz}} = 0,16 A$, lo cual supone un error relativo de 14% entre los dos resultados. Dado que se utilizó un modelo más simplificado que el ejemplo dado, este error se encuentra dentro del rango esperado.

⁷Capítulo 3, Sección 3.3

4.3. Validación con software comercial

Se tuvo acceso a un software comercial con el fin de estudiar el mismo y evaluar su utilidad para el cálculo de la densidad de flujo magnético generado por los elementos abarcados en el proyecto.

A pesar de que el programa poseía diversas herramientas de dibujo tridimensional, al comienzo no fue del todo intuitivo su uso. Finalmente, se pudieron modelar tres líneas rectas con corriente trifásica y una bobina simple, aunque para esta última el programa no era capaz de dibujar las líneas de campo sin colapsar. Por esta razón, se descartó la opción de dibujar un modelo esquemático de transformador de potencia con el objetivo de dibujar sus líneas de campo.

Bajo estas condiciones fue necesario proseguir con líneas, ya que resultaba ser el único modelo de complejidad tal que permitía el buen funcionamiento de dicho software. Se simuló el campo en líneas que describían una forma de catenaria con el objetivo de validar los resultados obtenidos con el software desarrollado.

4.3.1. Comparación de resultados

Se estudian y comparan dos modelos de líneas trifásicas, uno en el cual se consideran las líneas rectas y otro en el cual las mismas describen una forma de catenaria. Se considera el siguiente sistema de coordenadas:

- Eje x: origen en el poste de la línea, a nivel del suelo, positivo hacia la derecha
- Eje y: origen en el poste de la línea, a nivel del suelo, positivo hacia arriba.
- Eje z: origen en el poste de la línea, a nivel del suelo, positivo entrante.

Ambos modelos son en delta y responden a la configuración que se muestra en la sección 4.4.1.

Modelo de líneas trifásicas con rectas

Se imponen corrientes trifásicas de valor 50 A RMS y un vano de 50 m. Se procede a calcular el campo magnético en el *eje x*, a un metro del suelo ($y=1$).

El resultado de la comparación se observa en la figura 4.8.

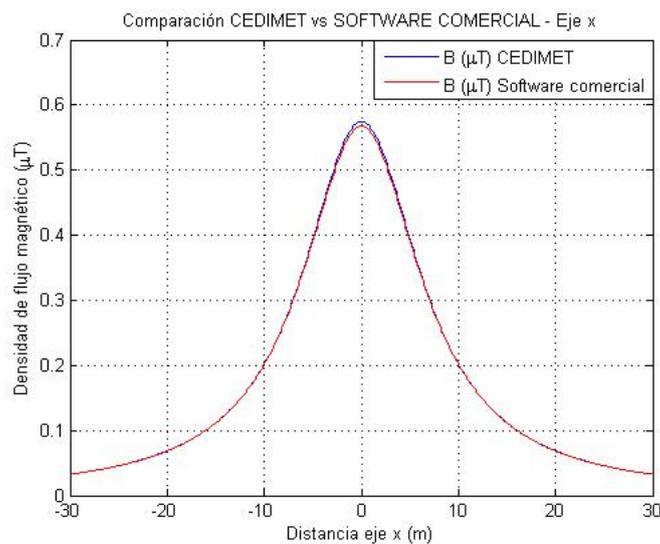


Figura 4.8: Comparación perfil de densidad de flujo magnético CEDIMET vs SOFTWARE COMERCIAL

4.3. Validación con software comercial

Se observa un resultado casi idéntico, salvo en el máximo, donde difiere en un 1 %.

Modelo de líneas trifásicas describiendo una catenaria

Se imponen las mismas condiciones anteriores, considerando que la forma de las líneas responde a la ecuación de la catenaria. Nuevamente, se evalúa la densidad de flujo magnético a un metro del suelo en el *eje x*.

El resultado de la comparación se expone en la figura 4.9.

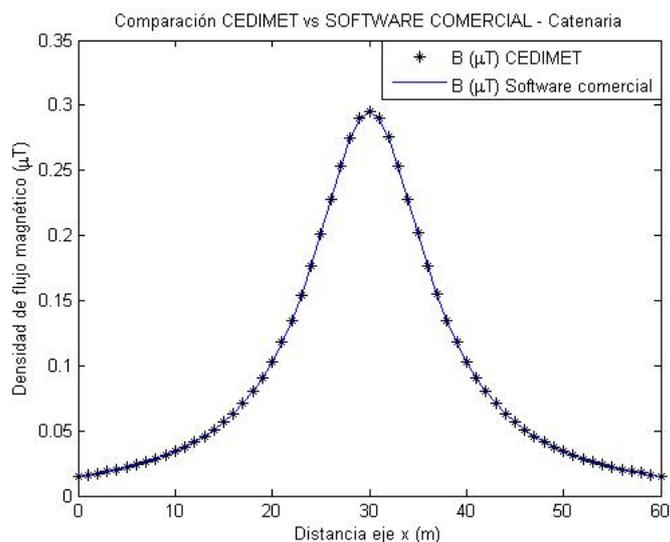


Figura 4.9: Comparación perfil de densidad de flujo magnético CEDIMET vs SOFTWARE COMERCIAL - Catenaria

Se observa que ambas simulaciones resultan prácticamente idénticas.

En un segundo estudio, tomando las hipótesis anteriores, se calcula la densidad de flujo magnético a lo largo del *eje z* y a un metro del suelo. En la figura 4.10 se muestran los resultados obtenidos.

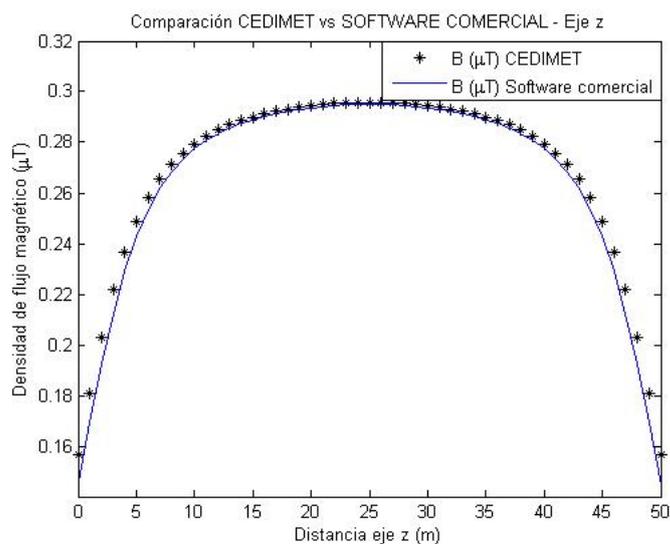


Figura 4.10: Comparación perfil de campo magnético CEDIMET vs SOFTWARE COMERCIAL

Se puede observar una diferencia que va aumentando desde 0 hasta alcanzar un valor aproximado de 9% en las puntas.

4.4. Validación con mediciones experimentales

Se busca validar el programa desarrollado mediante la comparación de los resultados brindados por el mismo, con mediciones experimentales. Con este propósito, se eligen líneas aéreas de Media Tensión (15 kV) cuyas características constructivas se correspondan con los modelos normalizados de UTE.

4.4.1. Características constructivas de la línea normalizada

El manual *Líneas aéreas de electrificación rural manual constructivo* [16] publicado por UTE en Marzo de 2006 indica los requisitos que deben cumplir las líneas aéreas de tensión 15 kV, apoyadas en postes de madera y de conductor desnudo destinadas a la electrificación rural.

En el mismo se incluyen los planos de proyecto, en los cuales se detalla la disposición de todos los elementos vinculados a la línea. Para llevar a cabo las mediciones se elige una línea de suspensión, cuyo detalle se muestra en la figura 4.11, donde todas las medidas están dadas en mm.

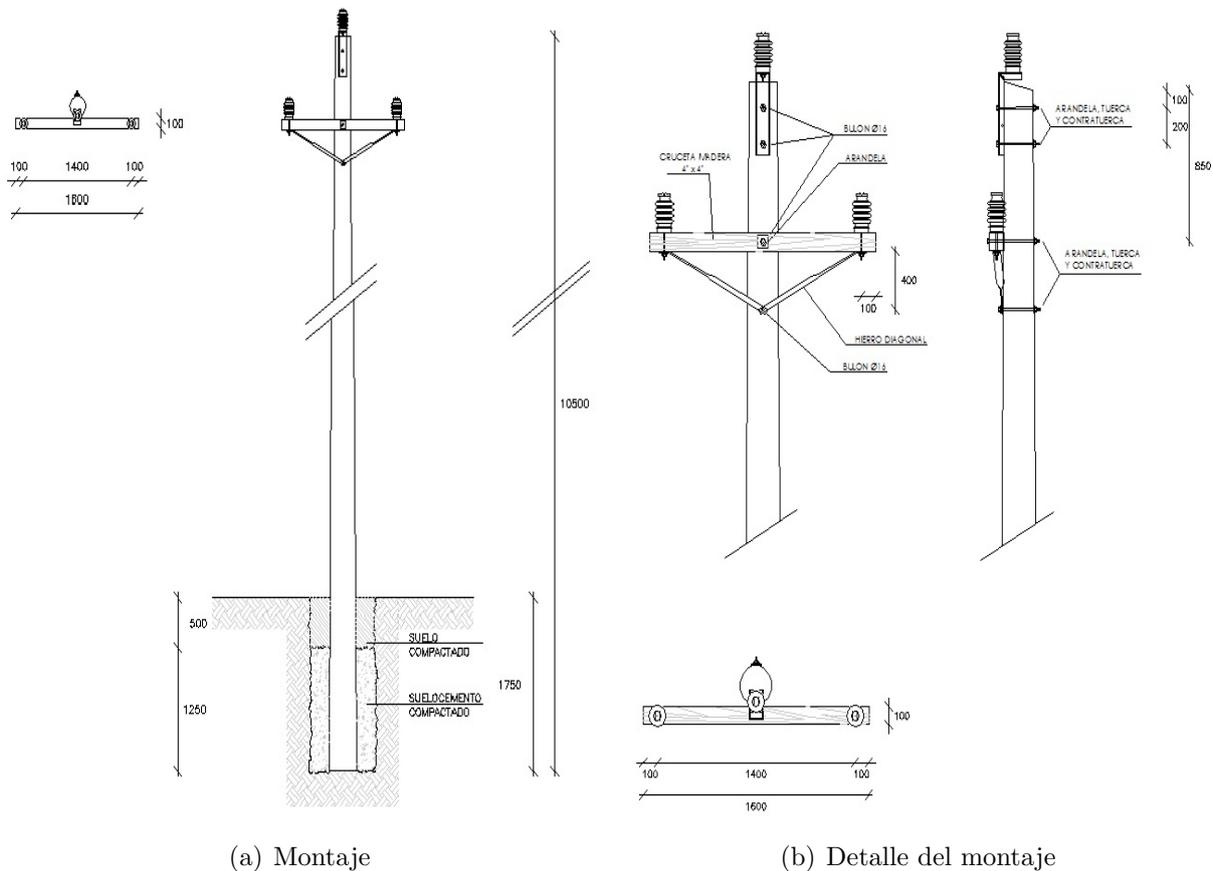


Figura 4.11: Línea aérea de 15 kV normalizada

4.4. Validación con mediciones experimentales

4.4.2. Instrumento de medida

Se utiliza como instrumento de medida el *SPECTRAN NF-5030*, el cual consiste en un analizador de espectro de compatibilidad/interferencia electromagnética con sensores para medición de campo eléctrico y magnético.

El equipo cuenta con las siguientes especificaciones:

- Rango de frecuencia: 1 Hz a 1 MHz
- Campo magnético (Tesla): 1 pT a 500 μ T
- Campo magnético (Gauss): 10 nG a 5 G
- Campo eléctrico: 0,1 CV/m a 5 V/m
- Detectores: RMS ó Mín/Máx
- Precisión: 3 %
- Medida de campo magnético en una, dos o tres dimensiones
- Visualización directa de los límites a la exposición de acuerdo con ICNIRP

4.4.3. Datos y simulaciones

Para efectuar las mediciones se elige un tramo de línea aérea correspondiente a la salida 2 de la estación de distribución 5053 Nuevo Sauce, en la localidad de Sauce, departamento de Canelones.

El tramo elegido tiene las siguientes características constructivas y eléctricas:

- Tensión= 15 kV
- Aislación del conductor= Desnudo
- Sección del conductor= 50/8 mm²
- Material del conductor= ACSR
- Número de conductores= 3
- Tipo de aisladores= Aislador line post porcelana
- Tipo de cruceta= Horizontal
- Tipo de apoyo= Poste de madera
- Longitud del tramo de línea normalizada= 2541 m
- Corriente RMS promedio por fase al momento de la medición= 8,3 A
- Vano= 76 m
- Temperatura ambiente= 15 °C

Se asume como hipótesis que el nivel del suelo es constante en el área donde se realizan las mediciones.

A partir de los datos anteriores, se procede a realizar distintas simulaciones con el software desarrollado.

Se considera el siguiente sistema de coordenadas:

Capítulo 4. Líneas

- Eje x: origen en el poste de la línea, a nivel del suelo, positivo hacia la derecha
- Eje y: origen en el poste de la línea, a nivel del suelo, positivo hacia arriba.
- Eje z: origen en el poste de la línea, a nivel del suelo, positivo entrante.

En primer lugar, se simula considerando la línea trifásica como rectilínea e infinita, obteniéndose los resultados mostrados en la figura 4.12.

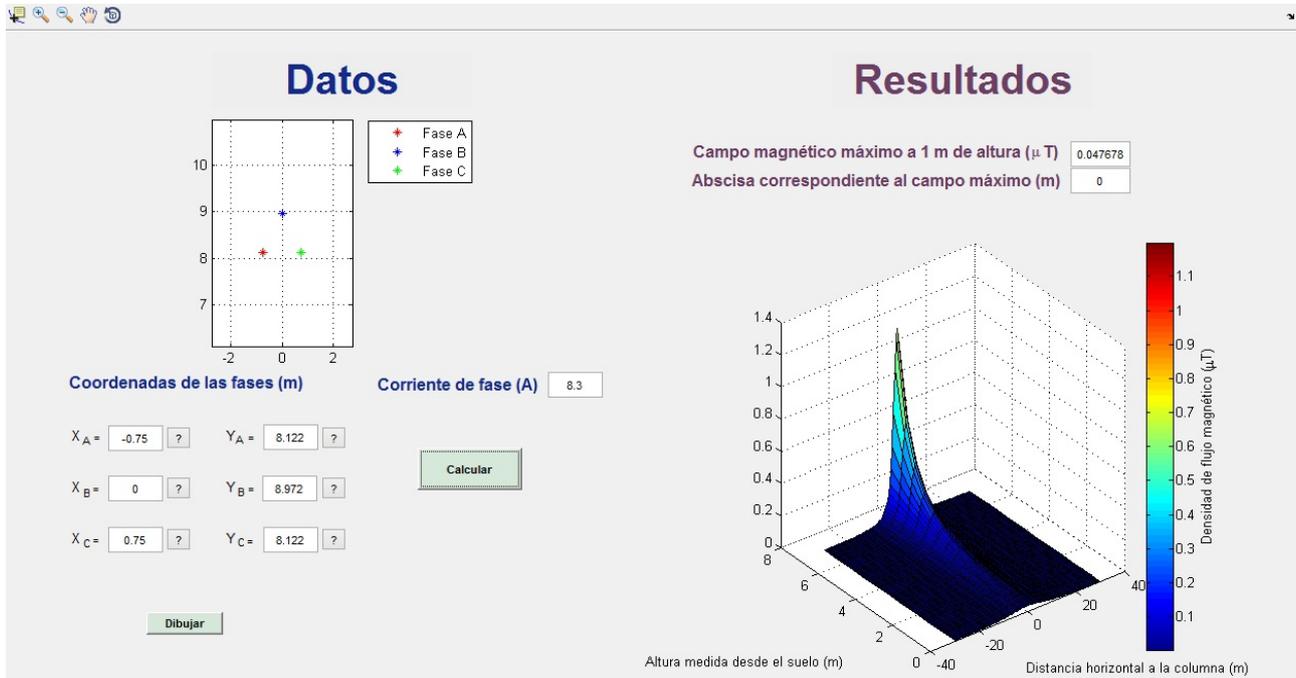


Figura 4.12: Simulación del campo magnético generado suponiendo la línea rectilínea e infinita

En segundo lugar, se simula considerando la forma de catenaria de la línea y un único vano. Para el tipo de conductor y el vano del tramo de línea elegido, considerando la temperatura ambiente de 15 °C, se tienen los siguientes valores de los parámetros involucrados en la ecuación de la catenaria:

- $H =$ Tensión máxima = 385 daN
- $q =$ Peso unitario del conductor = 0,196 daN/m

Estos datos fueron obtenidos de la tabla de tendido para un conductor de aluminio tipo ACSR 50/8 y vano regulador de 80 m, perteneciente al manual *Líneas Aéreas de Electrificación Rural Manual Constructivo* de UTE.

El resultado de la simulación se muestra en la figura 4.13

4.4. Validación con mediciones experimentales

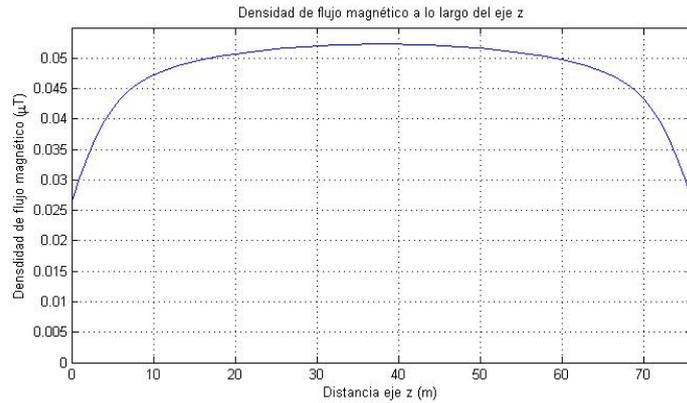


Figura 4.13: Simulación de la densidad de flujo magnético generado considerando la catenaria y un único vano

Por último, se simula considerando la forma de catenaria de la línea y el aporte a la densidad de flujo magnético de los dos vanos adyacentes, los cuales tienen longitudes diferentes, como se muestra en la figura 4.14.

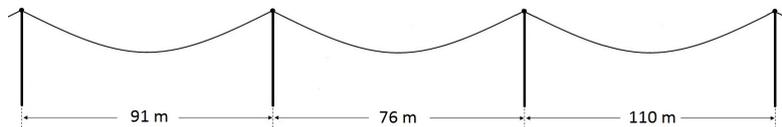


Figura 4.14: Longitudes del vano considerado y los vanos adyacentes

El resultado de la simulación se muestra en la figura 4.15

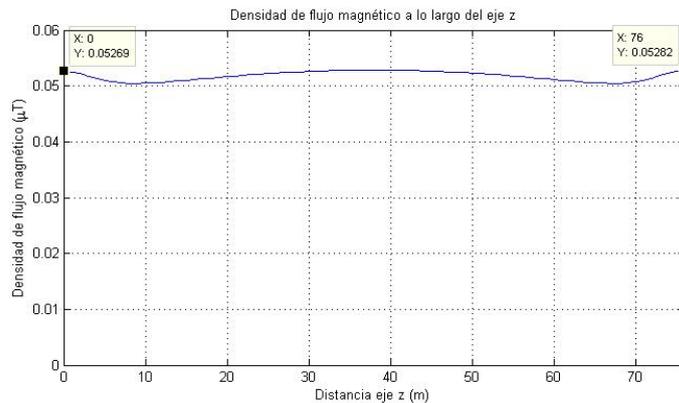


Figura 4.15: Simulación de la densidad de flujo magnético generado considerando la catenaria y los dos vanos adyacentes

Se observa que al considerar el aporte de los vanos adyacentes, cambia la distribución de la densidad de flujo magnético a lo largo del eje z, aumentando el valor de la misma en los extremos del vano principal. La diferencia entre los valores simulados para $z = 0$ m y $z = 76$ m se debe a las distintas longitudes de los vanos adyacentes.

4.4.4. Resultados de la medición

Se mide la densidad de flujo magnético a un metro del suelo y cada un metro a lo largo del eje que une las dos columnas del vano considerado (eje z). Para cada punto, se registra el valor máximo

Capítulo 4. Líneas

y el valor mínimo dado por el instrumento de medida, debido a la variabilidad que el mismo presenta instante a instante.

En la tabla 4.8 se muestran los resultados obtenidos.

Distancia (m)	Bmin (uT)	Bmáx (uT)	Distancia (m)	Bmin (uT)	Bmáx (uT)
0	0.0362	0.0370	39	0.0407	0.0413
1	0.0295	0.0314	40	0.0389	0.0419
2	0.0308	0.0314	41	0.0412	0.0419
3	0.0326	0.0348	42	0.0429	0.0450
4	0.0327	0.0360	43	0.0429	0.0447
5	0.0347	0.0356	44	0.0430	0.0450
6	0.0306	0.0319	45	0.0430	0.0450
7	0.0273	0.0328	46	0.0444	0.0460
8	0.0317	0.0344	47	0.0461	0.0468
9	0.0328	0.0346	48	0.0448	0.0466
10	0.0347	0.0380	49	0.0413	0.0428
11	0.0322	0.0341	50	0.0444	0.0460
12	0.0297	0.0326	51	0.0445	0.0477
13	0.0304	0.0326	52	0.0454	0.0476
14	0.0334	0.0355	53	0.0440	0.0460
15	0.0307	0.0340	54	0.0407	0.0432
16	0.0343	0.0360	55	0.0417	0.0436
17	0.0337	0.0363	56	0.0400	0.0422
18	0.0350	0.0370	57	0.0405	0.0422
19	0.0353	0.0372	58	0.0406	0.0422
20	0.0346	0.0362	59	0.0408	0.0430
21	0.0356	0.0370	60	0.0416	0.0421
22	0.0351	0.0370	61	0.0410	0.0430
23	0.0348	0.0363	62	0.0411	0.0429
24	0.0360	0.0376	63	0.0413	0.0435
25	0.0354	0.0372	64	0.0417	0.0429
26	0.0386	0.0401	65	0.0427	0.0437
27	0.0348	0.0382	66	0.0427	0.0446
28	0.0373	0.0383	67	0.0412	0.0429
29	0.0365	0.0384	68	0.0399	0.0412
30	0.0350	0.0387	69	0.0396	0.0406
31	0.0392	0.0403	70	0.0390	0.0409
32	0.0386	0.0419	71	0.0409	0.0417
33	0.0385	0.0390	72	0.0378	0.0387
34	0.0385	0.0390	73	0.0373	0.0383
35	0.0384	0.0394	74	0.0360	0.0373
36	0.0379	0.0406	75	0.0375	0.0400
37	0.0388	0.0411	76	0.0363	0.0377
38	0.0400	0.0427			

Tabla 4.8: Valores de campo magnético medidos a lo largo del eje z

4.4. Validación con mediciones experimentales

4.4.5. Análisis de los resultados

En la figura 4.16 se comparan los resultados medidos con la última simulación realizada, la cual considera el aporte de los tres vanos.

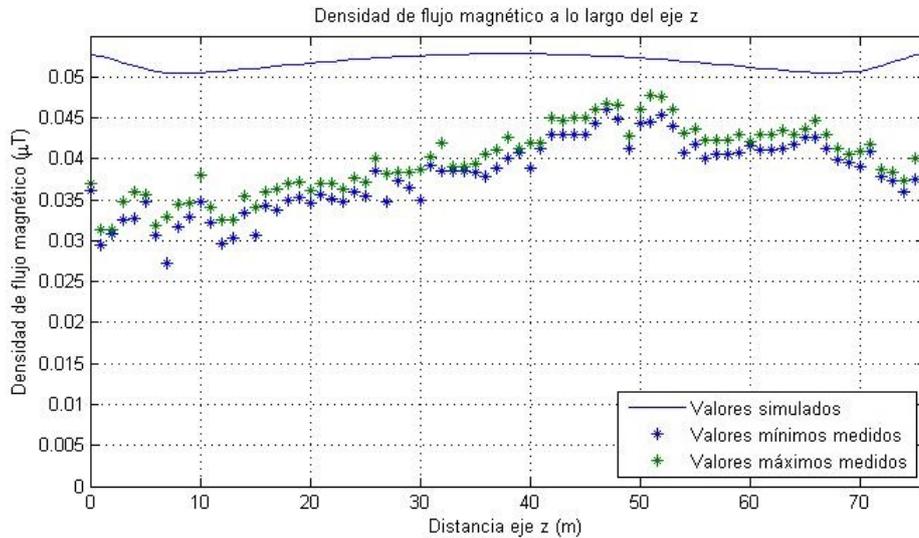


Figura 4.16: Comparación medidas vs simulación con tres vanos

Se observan diferencias tanto en la forma como en los valores, por lo que se buscan posibles causas de las mismas.

En primer lugar, se considera la variación en la corriente. Teniendo en cuenta la hora de comienzo y fin de las mediciones, y el tiempo dedicado a cada medición, se obtienen registros de corriente para cada punto medido. Es decir, en lugar de suponer la corriente con un valor RMS constante, se utiliza un vector de corrientes según el valor de la misma al momento de cada medición.

Los registros de corriente utilizados tienen un error asociado, debido a que el medidor almacena un valor de corriente en cierto instante y vuelve a almacenar un valor una vez que la corriente supera cierto delta con respecto al último valor almacenado. Esto implica que los registros se hacen para distintos intervalos de tiempo, por lo cual para que los tiempos coincidan con el momento en que se realiza la medida, se interpola.

Los valores de corriente considerados se muestran en la figura 4.17

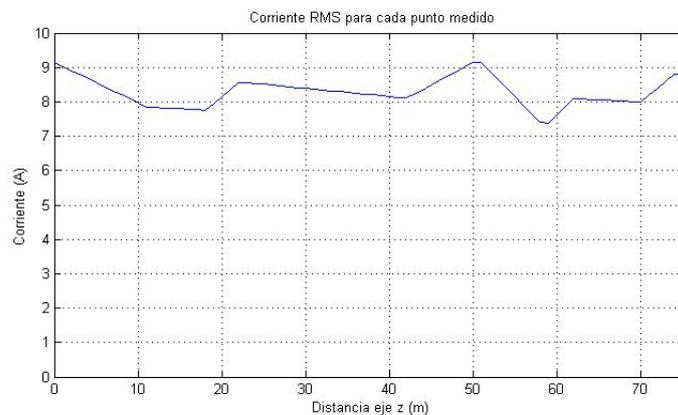


Figura 4.17: Corriente RMS para cada punto medido

Capítulo 4. Líneas

En la figura 4.18 se comparan los resultados medidos con una nueva simulación que tiene en cuenta la variación de la corriente.

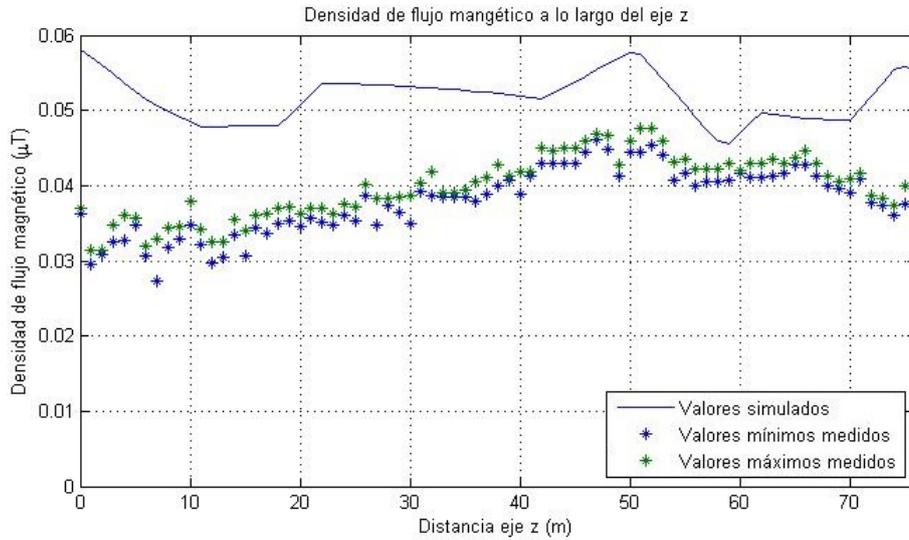


Figura 4.18: Comparación medidas vs simulación con tres vanos y vector de corrientes

En este caso, si bien la forma de la densidad de campo magnético simulado se asemeja más a la del medido, se continúan observando diferencias, principalmente en los valores.

Por lo tanto, en segundo lugar se analiza el desnivel del suelo como posible causa de las diferencias encontradas.

Se considera el perfil de elevación del suelo de la figura 4.19



Figura 4.19: Perfil de elevación del suelo

A partir de la figura se puede apreciar que la hipótesis de que el nivel del suelo es constante, no es

4.4. Validación con mediciones experimentales

correcta, por lo que se decide incorporar a la simulación el perfil de la figura 4.19. Como simplificación, se considera para el suelo el modelo de la figura 4.20:

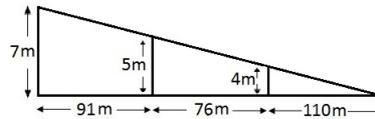


Figura 4.20: Simplificación del perfil del suelo

Se asume que los postes de madera se encuentran todos enterrados la misma profundidad, por lo cual el desnivel repercute directamente en la forma de la catenaria de los vanos. El punto más bajo de la línea deja de ocurrir en el medio del vano, trasladándose en dirección al apoyo que se encuentra a menor nivel.

En la figura 4.21 se comparan los resultados medidos con una nueva simulación que contempla, además de la variación de la corriente, el modelo del nivel del suelo de la figura 4.20.

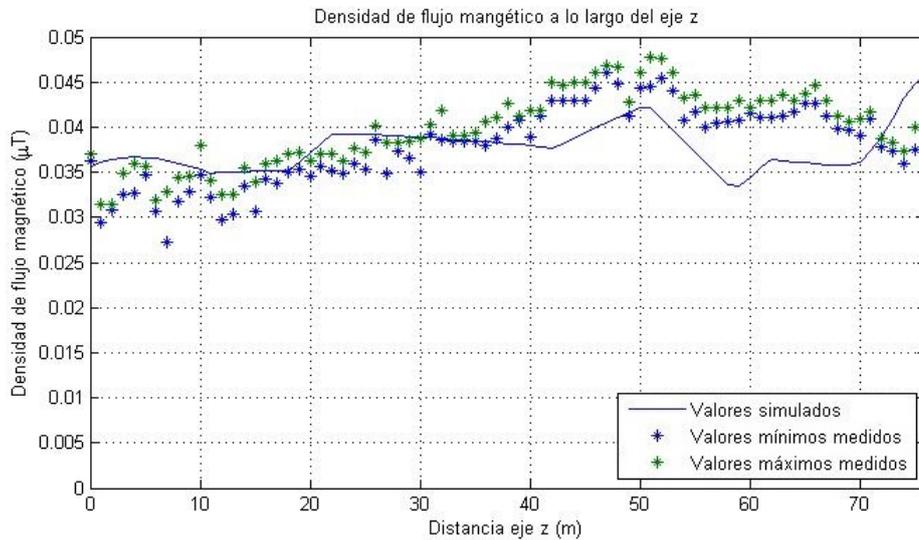


Figura 4.21: Comparación medidas vs simulación con tres vanos, vector de corrientes y perfil de elevación del suelo

Se verifica que el desnivel del suelo influye tanto en la forma como en los valores de la densidad de flujo magnético a lo largo del eje z .

En esta última comparación, se observa que para los valores de z cercanos a 60 m como los cercanos a 76 m , la diferencia entre lo medido y lo simulado es significativamente mayor que para el resto de los puntos. En el primer caso, las formas de las curvas son similares. Esto no ocurre para el segundo caso, donde los valores medidos tienden a bajar, mientras que los simulados suben. Para ambos casos, los errores relativos son del orden del 22 %.

En la figura 4.17 se puede apreciar que para los valores de z del segundo caso la corriente sube. Además, en la figura 4.22 se muestra la influencia del desnivel del suelo frente a una corriente constante, presentando la densidad de flujo magnético un crecimiento en la zona considerada.

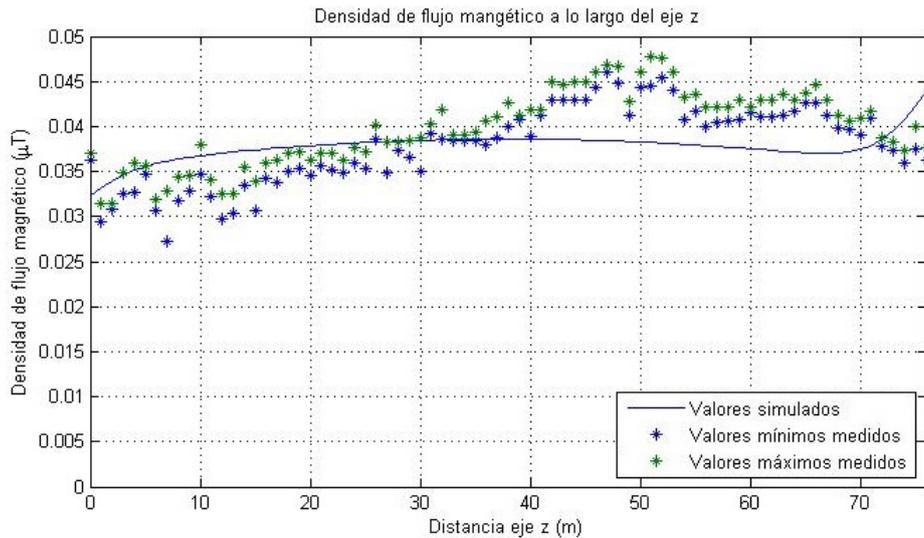


Figura 4.22: Comparación medidas vs simulación con tres vanos, vector de corrientes y perfil de elevación del suelo

Es por estas razones que los valores simulados crecen, por lo que no se explica por qué no ocurre lo mismo para los valores medidos.

Se debe recordar que el instrumento posee una precisión del 3%, se desconoce la precisión de la medida de las corrientes, así como la precisión en el perfil de elevación del suelo.

4.5. Resumen

Se desea modelar una línea trifásica de Media Tensión, por lo que se parte de un modelo simple basado en la Ley de Biot-Savart, en el cual se la considera como recta e infinita. Éste se valida a partir de publicaciones que analizan diversos casos, como por ejemplo variación de las configuraciones de líneas trifásicas, transposición de fases, entre otros. De la comparación entre lo simulado y lo expuesto en dichas publicaciones, se obtienen resultados dentro del rango considerado aceptable.

Luego, se realiza un modelo más minucioso, suponiendo la línea finita, con una forma que responde a la ecuación de una catenaria.

A ambos modelos se los compara con un software comercial, con el propósito de validarlos. A partir de esto, se nota una gran similitud con el primero y una identidad con el segundo, lo cual resulta apropiado de acuerdo a la literatura disponible.

Para finalizar el capítulo, se compara la simulación de CEDIMET con mediciones realizadas. Se encuentra que el nivel del suelo, que hasta el momento se había considerado uniforme en todos los casos, afecta notablemente los resultados. A su vez, queda expuesta la necesidad de conocer el valor pico de la intensidad de corriente para el intervalo de tiempo en el cual se realiza la medición, ya que esto repercute directamente en la densidad de flujo magnético. Se decide incorporar al modelo los detalles mencionados, obteniéndose diferencias entre lo medido y lo simulado del orden del 22%, consideradas aceptables.

Capítulo 5

Transformadores

Otro de los principales objetivos del proyecto es el estudio de los campos magnéticos generados por transformadores de potencia pertenecientes a instalaciones de Media Tensión. Para ello, se consulta la bibliografía relacionada, se estudian dos softwares que resuelven el problema 2D mediante el Método de los Elementos Finitos, se desarrolla un modelo para el transformador y se lo verifica experimentalmente.

5.1. Aspectos magnéticos del transformador

5.1.1. Flujo de dispersión

En un transformador ideal, existe un único flujo magnético, enteramente confinado en el núcleo y que liga a los bobinados de alta y baja tensión.

En cambio, en un transformador real, dado que la permeabilidad magnética del núcleo no es infinita así como la del medio que rodea a los bobinados no es nula, existen flujos de dispersión.

Dichos flujos aparecen en los arrollamientos, dependen de la corriente que circula por los mismos y no se cierran enteramente por el núcleo, por lo que no representan un flujo útil para la inducción electromagnética.

Los caminos cerrados que describen pueden abarcar todo el bobinado o una parte del mismo, dado que éste está formado generalmente por un gran número de espiras. Como se explica en [15], la distribución del flujo de dispersión se puede representar como en la figura 5.1.

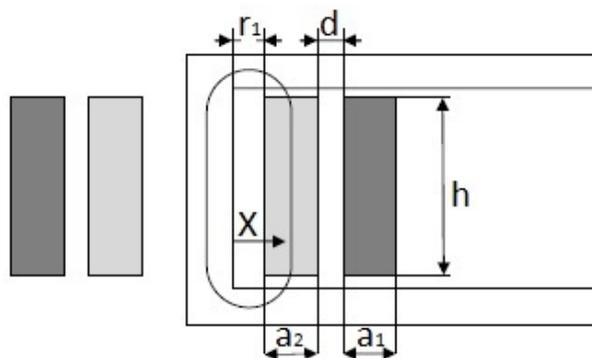


Figura 5.1: Flujo disperso en un transformador

Donde:

- X: Distancia según el eje x, con origen en la pared del núcleo.

Capítulo 5. Transformadores

- r_1 : Distancia según el eje x , desde la pared del núcleo hasta el comienzo del bobinado de baja tensión.
- a_2 : Ancho del arrollamiento de baja tensión.
- d : Separación entre arrollamientos.
- a_1 : Ancho del arrollamiento de alta tensión.

Si al camino de flujo disperso que se muestra en la figura 5.1 se le aplica la Ley de Ampere¹, variando X desde $X=0$ a $X=r_1 + a_2 + d + a_1$, se obtiene el campo magnético de dispersión, cuya distribución se muestra en la figura 5.2.

En la misma, la cruz denota que la corriente es entrante al plano en la bobina de baja, mientras que el punto representa que la corriente es saliente en la bobina de alta.

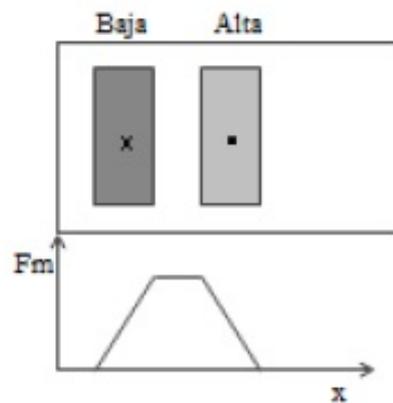


Figura 5.2: Campo magnético de dispersión

En [15] se concluye que los flujos de dispersión de ambos arrollamientos circulan por el canal que se forma entre ellos, ocurriendo que para el bobinado de baja tensión dichos flujos se cierran por el núcleo, mientras que para el bobinado de alta tensión lo hacen por la cuba del transformador, ya que tienden a buscar el camino de menor reluctancia.

5.1.2. Corrientes de Foucault

El núcleo del transformador, los conductores que forman los arrollamientos y la cuba son materiales conductores, aunque de distinta conductividad eléctrica, expuestos a campos magnéticos variables. Por lo tanto, de acuerdo a la Ley de Faraday², se inducen en ellos tensiones, las cuales provocan la circulación de corrientes parásitas, como se explica en [17].

Las mismas reciben el nombre de corrientes de Foucault (o corrientes de Eddy) y se encuentran contenidas en planos perpendiculares al flujo que las induce, circulando en un sentido tal que el flujo magnético que producen se opone al flujo inductor.

Es por esta razón que, por ejemplo, el núcleo de los transformadores se construye generalmente con láminas de hierro finas, las cuales se colocan paralelas a la dirección del flujo inductor, provocando que las corrientes inducidas queden confinadas en secciones pequeñas, reduciendo las pérdidas en el núcleo.

¹Capítulo 3, Sección 3.2

²Capítulo 3, Sección 3.3

5.2. Revisión bibliográfica relacionada

Los programas de simulación de densidad de flujo magnético que se presentan más adelante realizan análisis magnetoestáticos, por lo que no consideran la presencia de las corrientes de Foucault ni los campos magnéticos generados por las mismas.

5.1.3. Pérdidas parásitas en el transformador

Según [15], las pérdidas en los elementos estructurales del transformador pueden suponer un porcentaje considerable de las pérdidas totales en carga. Las mismas dependen de la magnitud del flujo de dispersión y se producen por la inducción de corrientes de Foucault, por lo que influyen en la distribución de la densidad de flujo magnético externa al transformador.

Dentro de las pérdidas parásitas, se destacan las que se producen en la cuba del transformador, debido a su tamaño, y se pueden diferenciar según dónde ocurren.

La tapa de la cuba es atravesada por los terminales de alta y baja tensión del transformador, los cuales transportan corrientes perpendiculares a la misma. Dichas corrientes generan campos magnéticos proporcionales a su valor, que circulan por la tapa de la cuba.

En las paredes de la cuba aparece una densidad de flujo magnético que corresponde al flujo de dispersión del arrollamiento de alta tensión, como se explicó anteriormente. Dicha densidad no se distribuye uniformemente, debido a los campos generados por las corrientes inducidas en la pared de la cuba. Cuanto mayor es la distancia del arrollamiento exterior a la cuba, menor es la densidad de flujo en la misma (mayor reluctancia).

En las paredes también aparece una densidad de flujo magnético que corresponde al campo generado por las barras que unen los extremos de los bobinados con las terminales de alta y baja tensión del transformador. Según cómo se agrupan las mismas para las tres fases del transformador, varía el campo magnético total.

Además, el campo magnético en la cuba se verá afectado por la presencia de bulones, tuercas y arandelas que unen la tapa con las paredes de la cuba, ya que las corrientes inducidas tenderán a cerrarse por los mismos. Esto puede provocar la inducción de campos magnéticos considerables en la superficie de dichos elementos.

5.2. Revisión bibliográfica relacionada

5.2.1. Transformer Handbook - ABB [10]

Es un manual elaborado por ABB con el objetivo de “*facilitar la comprensión de la física, la selección, el pedido, la operación y el mantenimiento de todo el rango de transformadores de potencia y distribución*”. En el mismo, existe una sección dedicada a la compatibilidad electromagnética, dentro de la cual se tratan los campos electromagnéticos en las proximidades de los transformadores.

Se hace referencia a la norma IEC 61000-2-7 “*Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 7: Low frequency magnetic fields in various environments*”, en la cual se muestran los resultados de mediciones realizadas en la instalación de un transformador de distribución de 315 kVA.

Dado que las medidas se tomaron con bobinas de campo y estaban considerablemente influenciadas por la presencia de armónicos, se indican valores a 50 Hz y a 0 – 2 kHz.

Los valores máximos obtenidos se muestran en la tabla 5.1.

Se indica que se detectó campo magnético hasta una distancia aproximada de 10 m del recinto físico de la subestación.

También se menciona que, de acuerdo a la experiencia práctica, los valores medidos de campo electromagnético alrededor de un transformador dependen de la forma en la que se realiza la medición,

Capítulo 5. Transformadores

Lugar	Frecuencia	Densidad de flujo magnético (μT)
Adyacente a las conexiones del transformador	50 Hz	250
	0 kHz - 2 kHz	380
Encima del transformador	50 Hz	20
	0 kHz - 2 kHz	75
Adyacente a los cables de baja tensión	50 Hz	25
	0 kHz - 2 kHz	90

Tabla 5.1: Valores máximos medidos de densidad de flujo magnético en los alrededores del transformador

no existiendo un estándar internacional que describa cómo se debe medir para conseguir resultados consistentes.

5.2.2. Distribution transformers and EMC - SIEMENS [11]

En este artículo se explican la características del transformador que generan campos magnéticos y eléctricos. Estos son una fuente de interferencia en términos de Compatibilidad Electromagnética, la cual a su vez está sujeta a regulaciones técnicas y legales.

Se explica que, a la frecuencia de la red (50 Hz), los campos eléctricos y magnéticos pueden ser desacoplados y considerados independientemente.

Los campos eléctricos aparecen entre los conductores y entre conductores y tierra, y sus magnitudes dependen del voltaje, las distancias y la geometría de los electrodos.

En comparación con los campos eléctricos, los magnéticos son una mayor fuente de perturbaciones, por lo que el artículo se centra en los mismos.

Se enumeran las fuentes de campo magnético de dispersión en un transformador, en orden ascendente de importancia:

- Campo de dispersión en operación sin carga.
- Campo de dispersión de los cables de los terminales bajo carga, principalmente del lado de baja tensión donde las corrientes son mayores.
- Campo de dispersión de las bobinas portadoras de corriente en carga.

Estos campos son complejos, ya que varían en el tiempo y en el espacio, viéndose afectados por el hierro de la cuba.

El campo magnético en condiciones de operación sin carga es producido por la fuerza magnetomotriz que genera la corriente de vacío que circula por el bobinado primario del transformador, cuyo valor y forma de onda dependen de los requerimientos del núcleo de hierro para magnetizarse.

Dado que la curva de magnetización del núcleo de un transformador es no lineal, la corriente de vacío tiene armónicos que también están presentes en el campo magnético de dispersión, el cual es aproximadamente 10 veces menor que el generado por las bobinas portadoras de corriente en carga, por lo que puede en general ser despreciado.

En cuanto al campo de dispersión producido por los terminales (cables y barras), en el artículo se menciona que en las configuraciones de conductores donde la suma de las corrientes es nula, cuanto más cerca entre sí se encuentren los conductores, más pequeño será el campo resultante generado. Esto ocurre ya que, para cada punto del espacio, el campo magnético resultante es función de la suma vectorial de todos los campos generados en ese punto por los distintos conductores que transportan corriente.

Por último, el artículo trata sobre los campos de dispersión generados por las bobinas primaria y secundaria, cuando las mismas transportan la corriente de carga. Éste es emitido por el espacio entre las bobinas y causa interferencias en las cercanías del transformador.

5.2. Revisión bibliográfica relacionada

Por lo tanto, con el transformador operando bajo carga, se tienen dos campos de dispersión, el generado por las terminales de baja tensión (altas corrientes) y el generado por los bobinados.

En el artículo se los compara a ambos, en función de la distancia al transformador. Para ello, se presenta un modelo de cálculo en el cual el campo de dispersión se distribuye en forma semiesférica en una distancia cercana al mismo.

Los resultados obtenidos corresponden a un transformador de 630 kVA, transportando su corriente nominal en cortocircuito y encapsulado en resina.

Los mismos se muestran en la figura 5.3.

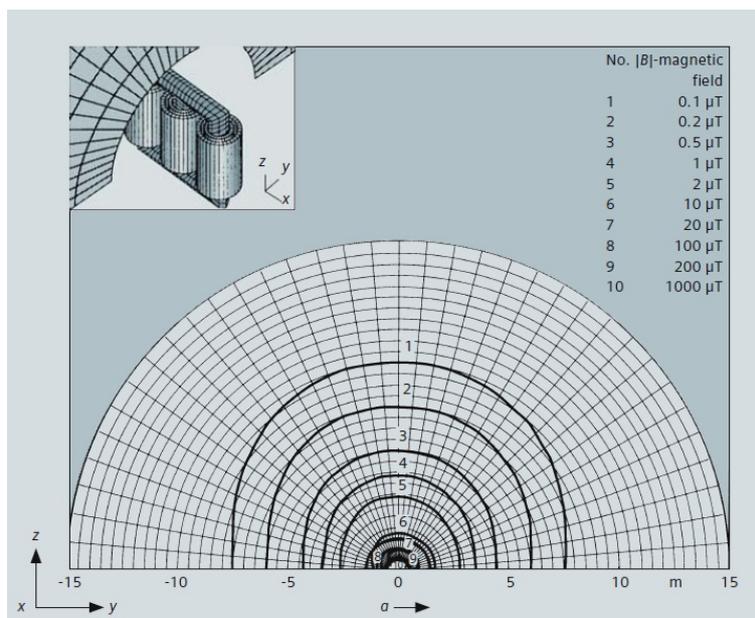


Figura 5.3: Campo de dispersión en las cercanías de un transformador de 630 kVA

En el artículo se concluye que, para una distancia de entre 0 m y 1 m, los valores de \vec{B} caen con la distancia al cuadrado, mientras que para distancias de entre 1 m y 10 m, la caída es proporcional a la distancia con un exponente de entre 2 y 3. De esta forma, se puede expresar $\vec{B} = f(d)$, donde d es la distancia al transformador en metros, como:

$$B(d) = B_3 \left(\frac{3}{d} \right)^x, 2 < x < 3 \quad (5.1)$$

donde B_3 es el campo medido a una distancia de 3 m. En el artículo se elige un exponente de 2,8, por ser el que ajusta mejor a los valores medidos. Esta expresión corresponde al campo generado por el transformador, sin tomar en cuenta sus terminales.

Para distancias mayores a 10 m, se considera que \vec{B} cae con la distancia al cubo.

Se modelan las terminales de baja tensión como un sistema de tres barras, para calcular el campo generado por mismas. Dicho campo depende de la cercanía entre las barras y cae con la distancia al cuadrado.

En la figura 5.4 se muestra la comparación entre el campo de dispersión generado por el transformador (valores medidos) y el campo de dispersión generado por el sistema de barras (valores calculados), observándose la variación de ambos en función de la distancia. Para una distancia de hasta 3 m del transformador, el generado por las bobinas es mayor.

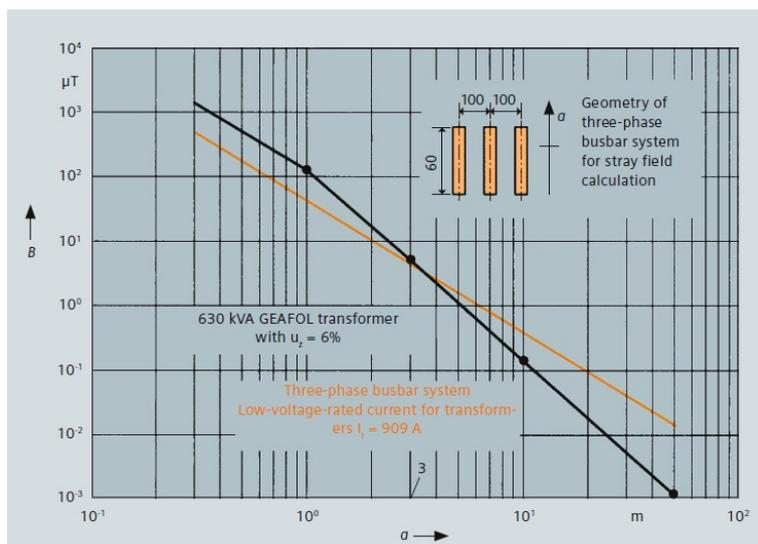


Figura 5.4: Campo de dispersión generado por el transformador vs campo de dispersión generado por el sistema de barras de las terminales de baja tensión

Dado que el campo de dispersión es el responsable de la existencia de la reactancia del transformador, en el artículo se relaciona a dicho campo con u_z , que representa la impedancia de cortocircuito. Además, se infiere que el flujo de fugas depende de la raíz cuadrada de la potencia aparente nominal del transformador. En consecuencia, se puede expresar \vec{B} como:

$$B = B_0 \frac{u_z}{u_{z0}} \sqrt{\frac{S_r}{S_{r0}}} \left(\frac{d_0}{d}\right)^x k_T, 2 < x < 3 \quad (5.2)$$

Donde:

- k_T es el factor de carga del transformador, con respecto a su carga nominal.
- B_0 es el valor de la inducción a la distancia d_0 del transformador ensayado.
- u_{z0} es la impedancia de cortocircuito del transformador ensayado.
- S_{r0} es la potencia aparente nominal del transformador ensayado.

Como en este artículo se ensayó un transformador de 630 kVA a corriente nominal y, para $d = 3$ m se obtuvo $B_3 = 5 \mu T$, la ecuación 5.2 se puede escribir como:

$$B = 5 \mu T \frac{u_z}{6\%} \sqrt{\frac{S_r}{630 \text{ kVA}}} \left(\frac{3m}{d}\right)^{2,8}$$

Por lo tanto, se concluye que el campo de dispersión producido por el transformador depende exclusivamente de sus características técnicas.

5.2.3. Evaluación de los campos electromagnéticos alrededor de los transformadores de potencia - Informe UNE [12]

Este documento es un reporte técnico de la UNE el cual tiene por objetivo ser una “guía sobre los fenómenos electromagnéticos asociados con la Compatibilidad Electromagnética para los transformadores de potencia”.

5.3. Transformador 250 kVA 15/0,4 – 0,23 kV

Aplica para transformadores de potencia aparente de entre 5 kVA y 1000 MVA con un nivel de aislación de hasta 525 kV para ambos arrollamientos, funcionando en condiciones nominales de tensión y corriente, excluyéndose eventos transitorios como cortocircuitos, sobrecargas, sobretensiones, entre otros.

Según este documento, a frecuencia industrial, el campo magnético más relevante es el generado por la corriente que circula por los bornes de baja tensión, ya que el campo producido por el transformador correspondiente a las corrientes que circulan por sus bobinados, es despreciable.

En el caso de un transformador sin cuba, el campo magnético a frecuencia industrial generado por el mismo, tiene el mismo orden de magnitud que el campo producido por las corrientes que circulan por los bornes de baja tensión.

Si se instala una envolvente adecuada, se puede reducir el efecto de dicho campo.

Reporte técnico vs Norma internacional

El documento presentado anteriormente corresponde a un reporte técnico.

Según [18] un reporte técnico (TR) reúne información de un tipo diferente al que se encuentra publicado en una norma internacional, tiene un carácter exclusivamente informativo y no debe tener contenido normativo.

En cambio, una norma internacional (IS) es un documento, establecido por consenso y aprobado por un organismo reconocido, que brinda reglas, pautas o características para actividades o sus resultados con el objetivo de alcanzar un grado óptimo de orden en un contexto dado. Este tipo de documento pretende además ser de uso común y repetido. Debe ser adoptada por una organización internacional de normalización, la cual coloca a la norma a disposición del público.

5.3. Transformador 250 kVA 15/0,4 – 0,23 kV

En principio se estudia un transformador bitensión diseñado para cumplir la especificación técnica de UTE, NO-DIS-MA-4503. Se realiza un modelo simplificado en dos dimensiones del mismo, con el fin de analizar la densidad de flujo magnético en sus alrededores. Para esto, se utilizan los datos constructivos de núcleo, bobinas y cuba, proporcionados por el fabricante, los cuales se detallan a continuación.

A lo largo de esta sección, se utilizan los términos alta tensión (AT) y primario de forma indistinta, así como los términos baja tensión (BT) y secundario. Cabe aclarar que al hablar de AT o BT no se refiere a los rangos de tensión definidos en el Capítulo 1, Sección 1.3.

5.3.1. Detalles constructivos

Núcleo

El transformador posee un núcleo de tres columnas, construido a partir del apilado de láminas de distintos anchos. De esta manera se forman escalones, los cuales aproximan la sección a una circular, como se puede observar a modo de ejemplo en la figura 5.5.

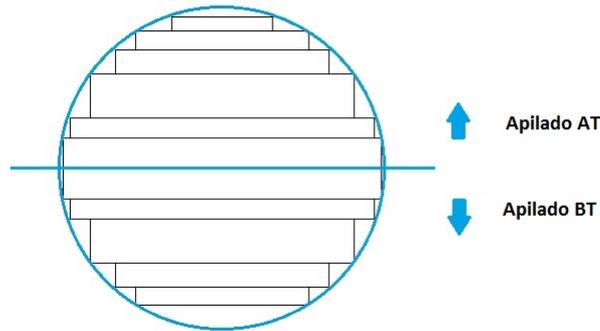


Figura 5.5: Corte transversal de la columna del núcleo

En esta figura, aparecen los conceptos de apilado AT y BT, correspondientes al lado del núcleo en el cual se realizan las conexiones del primario y las del secundario respectivamente. En la mayoría de los casos en que se tienen bobinas circulares, ambos apilados son iguales, pero existen otros donde las conexiones de la bobina de baja tensión se realizan a partir de barras, que tienden a ovalar ese lado. Por esta razón, se opta en esos casos por reducir el apilado de BT para contrarrestar la deformación y favorecer la forma circular de la bobina.

Las láminas son de hierro silicio de grano orientado, material del cual se tiene la curva de magnetización, proporcionada por una empresa dedicada a la fabricación de núcleos. La misma se presenta en la figura 5.6.

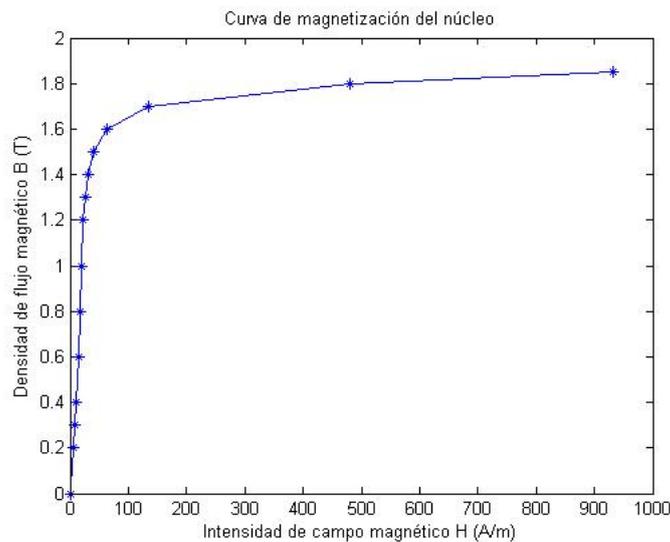


Figura 5.6: Curva de magnetización del hierro silicio de grano orientado del núcleo

Bobinado

Cada bobinado consta de un tubo de material aislante sobre el cual se enrolla la primera capa de conductor, seguida de una de material aislante a modo de separar las distintas capas. Además, existe un canal de refrigeración, único en este caso, ubicado entre dos capas para favorecer la circulación del líquido refrigerante. Luego, sobre el bobinado de baja tensión, se coloca el tubo correspondiente al bobinado de alta y, una vez más, se repite el mismo procedimiento de montaje, para posteriormente colocar ambos arrollamientos en la columna del núcleo. A su vez, con el objeto de brindar rigidez y aislamiento eléctrico, las bobinas cuentan con cuñas de material aislante en sus extremos.

5.3. Transformador 250 kVA 15/0,4 – 0,23 kV

Debido a la magnitud de la intensidad de corriente que circula por el secundario, se necesita de conductores de gran sección, razón por la cual se utiliza folio de aluminio. Este consiste en una lámina que se bobina como un solo conductor por capa. Por otro lado, el primario se forma a partir de un alambre redondo esmaltado, y todo el conexionado en alta tensión (AT) se realiza con éste mismo. Esto no ocurre en baja tensión (BT), ya que el folio por sí solo no permite conectarlo y es necesario soldar barras de aluminio de sección adecuada al principio y final de la bobina, para luego a partir de flejes de este mismo material conectar a los aisladores. Cabe destacar que, al ser bitensión, no sólo tiene las barras de principio y fin de bobina, sino que también una barra media para la salida de 230 V tal como se muestra en la figura 5.7.

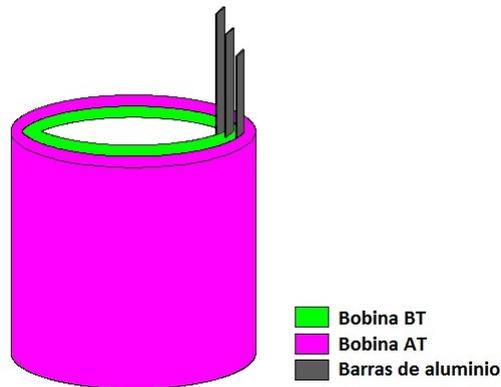


Figura 5.7: Bobinas primaria y secundaria del transformador

La aislación entre capas antes mencionada es de papel aislante conocido como “Prespan”, dimensionado a la tensión que ha de soportar en el ensayo de tensión aplicada.³

Cuba

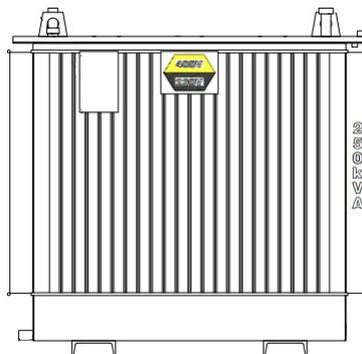


Figura 5.8: Cuba del transformador considerado

El transformador posee una cuba de llenado integral (figura 5.8), es decir, la parte activa se encuentra totalmente inmersa en líquido aislante, que en este caso es aceite dieléctrico.

En todos sus laterales consta de paneles corrugados de acero, con un espesor de chapa de 1,2 mm, un alto de aleta de 850 mm y una profundidad de 200 mm en los de mayor dimensión, y 80 mm en los de menor como se puede apreciar en la figura 5.9.

³Ensayo de tensión inducida según norma IEC-60076-3. Sección 12.

Por otro lado, por cuestiones de rigidez, el fondo está constituido por chapas del mismo material, de 3,2 mm de espesor.

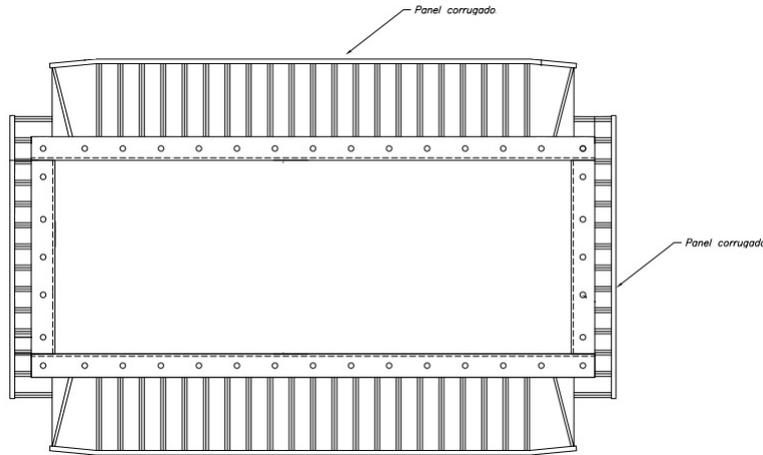


Figura 5.9: Vista superior de la cuba del transformador

5.3.2. Programas estudiados

Toolbox PDE Matlab

Se trata de una herramienta de Matlab que permite resolver ecuaciones en derivadas parciales utilizando el Método de Elementos Finitos y, junto con la interfaz gráfica denominada PDEtool, es posible especificar el dominio 2D del problema a tratar, la triangulación del dominio, los coeficientes de las respectivas ecuaciones así como también las condiciones de contorno.

Por lo tanto, es una herramienta que permite definir un problema en ecuaciones de derivadas parciales, resolverlo numéricamente, obtener una solución aproximada y mostrarla gráficamente.

Si luego de lo presentado en esta sección se desea profundizar en la herramienta, se puede consultar [19].

Para especificar la ecuación en derivadas parciales a resolver, existe un menú que permite escoger un problema tipo.

La ecuación básica de la PDE Toolbox es la elíptica, la cual es de la forma

$$-\nabla \cdot (c \nabla(u)) + a u = f \text{ en } \Omega \quad (5.3)$$

Dónde Ω es el dominio acotado donde se busca resolver la ecuación; c , a y f son los escalares que se deben introducir y u , también escalar, es la incógnita. Los coeficientes pueden ser funciones de x y de y , y para problemas no lineales también pueden ser función de u , ux , uy .

Se pueden definir distintos coeficientes para subdominios independientes, lo que permite diferenciar, por ejemplo, distintos materiales en el problema.

Dentro de las ecuaciones elípticas, PDETool cuenta con la opción *Magnetostatics*, la cual está pensada para resolver problemas magnetoestáticos: imanes, transformadores, motores. La característica de “statics” implica que se pueden utilizar las Ecuaciones de Maxwell para casos estáticos, dado que la velocidad de variación del flujo es lenta.

Los dominios se construyen en base a la suma y/o resta de una serie de dominios elementales, tales como polígonos y elipses. Luego, se les puede asignar condiciones de contorno a los segmentos que representan el borde del dominio.

Se pueden especificar condiciones de contorno tipo Dirichlet, de la forma

$$h u = r$$

5.3. Transformador 250 kVA 15/0,4 – 0,23 kV

introduciendo los valores de las constantes h y r , las cuales por defecto son 1 y 0 respectivamente. Otra opción son las condiciones tipo Neumann, donde se deben especificar los coeficientes g y q de la fórmula

$$\vec{n} \cdot c \nabla(u) + q u = g$$

Al tratarse de un problema magnetoestático, se deben definir los parámetros de la Ecuación de Laplace - Poisson (3.23), ingresando para cada subdominio el valor de permeabilidad magnética μ y densidad de corriente J .

La incógnita del problema (u) es el vector potencial magnético A y la densidad de flujo magnético se obtiene como $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$

Como se vio en la sección 3.6 del capítulo 3, al atravesar una interfaz entre dos medios de diferentes propiedades magnéticas, la componente normal de la densidad de flujo magnético \vec{B} es continua.

Si se asume la permeabilidad magnética del núcleo del transformador como infinita, dado que según la ecuación 3.26 la componente tangencial del campo magnético es continua, sustituyendo $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$ se obtiene que la densidad de flujo magnético del lado del aire en la interfaz núcleo-aire tiene únicamente componente normal. Considerando, por ejemplo, una frontera vertical, \vec{B} sólo tiene componente según \hat{i} .

De 3.21 se obtiene que:

$$\frac{\delta A(x, y)}{\delta x} = 0 \quad (5.4)$$

Tomando $q = 0$, la condición de borde de Neumann establece que:

$$\vec{n} \cdot (c \cdot \nabla \vec{A}) = g$$

Si $c = 1$, dado que se considera una frontera vertical, se cumple que $\vec{n} = \hat{i}$ y:

$$\hat{i} \cdot \left(\frac{\delta \vec{A}}{\delta x} \hat{i} + \frac{\delta \vec{A}}{\delta y} \hat{j} + \frac{\delta \vec{A}}{\delta z} \hat{k} \right) = \frac{\delta \vec{A}}{\delta x} = g$$

Finalmente, utilizando 5.4, se deduce que $g = 0$.

Por lo tanto, las condiciones de borde para las interfaces hierro/aire de un transformador, son condiciones de Neumann, con $c = 1$ y $q = g = 0$.

Además, la ecuación 3.26 implica la continuidad de $\frac{1}{\mu} \frac{\delta \vec{A}}{\delta n}$.

Al ingresar la densidad de corriente en un subdominio, se debe tener en cuenta que el signo de la misma determina el sentido de circulación de la corriente. Por ejemplo, en el corte transversal de una bobina se debe ingresar para cada sección la misma densidad de corriente pero con sentido opuesto.

En cuanto a la permeabilidad magnética, varía en los materiales ferromagnéticos con los cuales están hechos los núcleos de los transformadores, ya que las curvas de magnetización $\vec{B} = f(\vec{H})$ son no lineales. Dado que para PDETool la variable del problema es el vector potencial magnético, se debe buscar escribir la variación de la permeabilidad magnética con dicha magnitud. De la ecuación 3.19 se deduce que el módulo de \vec{B} es igual al módulo de $\nabla \vec{A}$, por lo que se puede escribir $\mu = f(|\nabla \vec{A}|)$, donde $|\nabla \vec{A}| = \sqrt{ux^2 + uy^2}$.

Es importante destacar que PDETool no exige que los datos sean ingresados en un sistema de unidades determinado, por lo cual se debe ser coherente a lo largo del modelado del problema con un único sistema de unidades.

Una vez determinado el problema (geometría, condiciones de borde y coeficientes de la Ecuación de Laplace-Poisson), se define la triangulación inicial, dividiendo el dominio en pequeños triángulos para la implementación del Método de Elementos Finitos. Es posible refinar la malla de así desearlo,

teniendo en cuenta que cuanto más densa es la misma, se obtiene mayor exactitud en la resolución del problema pero aumentando el costo computacional asociado.

Una vez definidos todos estos pasos, se puede resolver la ecuación en derivadas parciales y visualizar gráficamente la solución.

Para resolver el problema es necesario habilitar la opción de “*use nonlinear solver*”, la cual permite resolver un problema donde existen parámetros no lineales, como la permeabilidad magnética en este caso. Se debe especificar la tolerancia, una solución inicial si es conocida y el método de aproximación del Jacobiano (iteración de punto fijo (*fixed*), aproximación diagonal (*lumped*) o el Jacobiano completo (*full*)).

En cuanto a los resultados, los mismos se muestran gráficamente en el dominio del problema, pudiéndose observar el potencial magnético A , la densidad de flujo magnético B o la intensidad de campo magnético H .

Cada una de estas magnitudes se puede graficar como un mapa de colores (2D o 3D), curvas de nivel o líneas de campo.

Es posible exportar y almacenar la geometría del problema, la malla utilizada y la solución (potencial magnético) encontrada para utilizarlas dentro de otros programas en Matlab.

Evaluación del software

Para evaluar la herramienta PDETool en la resolución de problemas magnetoestáticos, se considera una de las columnas de un transformador trifásico de $15/0,4kV$ y $250kVA$.

La bobina de alta tensión (AT) está construida con un conductor redondo de aluminio, aislado con esmalte y tiene n_{AT} vueltas dispuestas en c_{AT} capas aisladas con papel diamantado.

La bobina de baja tensión (BT) está construida con folio de aluminio, dispuesto en c_{BT} capas aisladas entre ellas con papel diamantado.

Las densidades de corriente de los conductores son j_{AT} y j_{BT} .

Para el modelado en PDETool, se decide representar las bobinas como bloques rectangulares, por lo que es necesario aplicar factores que modelen de forma aproximada la distribución real de corriente.

Dichos factores son:

- Factor de llenado: Corresponde a la relación entre el área de conductor y el área del cuadrado en la cual el mismo se encuentra inscrito.
- Factor de bobinado: Es un valor práctico que depende de cada bobinador, brindado por la empresa fabricante de transformadores y que considera la holgura con la cual se realizó el bobinado.
- Factor de aislación: Corresponde a la relación entre el espesor que ocupa el material aislante presente entre capas (papel) y el espesor total de la bobina.

La bobina de AT está construida con un conductor redondo de radio r_{AT} , por lo que se debe aplicar un factor de llenado que relacione la sección del conductor con el cuadrado en el cual la misma se encuentra inscrita:

$$f_{llenado_{AT}} = \frac{\text{Área conductor}}{\text{Área cuadrado}} = \frac{\pi r_{AT}^2}{(2r_{AT})^2} = 0,7854$$

Al tratarse de un conductor redondo, existe un factor de bobinado tanto para el eje radial como para el eje axial. El fabricante proporciona ambos valores, los cuales en este caso coinciden y valen $f_{bobinado_{AT}}$.

Por último, cada capa de papel aislante dispuesta entre los conductores tiene un espesor de $e_{papel_{AT}}$ y el esmalte que recubre a los conductores genera una aislación de espesor $e_{esmalte}$.

5.3. Transformador 250 kVA 15/0,4 – 0,23 kV

Por lo tanto:

$$f_{aislación_{AT}} = \frac{c_{AT} (2 e_{esmalte} + e_{papel_{AT}})}{\text{Ancho bobina } AT} + \frac{\left(\frac{n_{AT}}{c_{AT}}\right) (2 e_{esmalte})}{\text{Altura bobina } AT} = 0,258$$

En cuanto a la bobina de BT, al ser de folio no corresponde calcular un factor de llenado:

$$f_{llenado_{BT}} = 1$$

Además, sólo existe un factor de bobinado según el eje radial, que vale $f_{bobinado_{AT}}$.

Por último, para el factor de aislación se deben considerar las capas de papel diamantado que separan las vueltas de la bobina y el canal (único) ubicado entre dos capas. Se considera el corte ventana del transformador, por lo que no se tienen en cuenta las tres barras de la bobina de BT.

El papel diamantado tiene un espesor de $e_{papel_{BT}}$, la bobina tiene c_{BT} capas y el canal tiene un espesor e_{canal} por lo que:

$$f_{aislación_{BT}} = \frac{c_{BT} e_{papel_{BT}} + e_{canal}}{\text{Ancho bobina } BT} = 0,273$$

Finalmente, las densidades de corriente que se deben ingresar en PDETool son:

$$j_{Bobina_{AT}} = j_{AT} (1 - ((1 - f_{llenado_{AT}}) + f_{bobinado_{AT}} + f_{aislación_{AT}})) \quad (5.5)$$

$$j_{Bobina_{BT}} = j_{BT} (1 - ((1 - f_{llenado_{BT}}) + f_{bobinado_{BT}} + f_{aislación_{BT}})) \quad (5.6)$$

Densidad de flujo magnético producido por una bobina

Para verificar el correcto funcionamiento del software, se decide evaluar un caso sencillo cuyo resultado puede ser corroborado mediante la aplicación de una fórmula.

Se considera la bobina de alta tensión del transformador presentado anteriormente, a la cual se le asigna un radio interno mucho menor que su altura.

Dado que las líneas de campo en una bobina se cierran sobre sí mismas, y al cumplirse que el largo es mucho mayor que el radio de la bobina, la densidad de flujo magnético es intensa y constante en el interior y débil en el exterior de la misma.

El valor de B puede ser calculado mediante la aplicación de la Ley de Ampere⁴:

$$B L = \mu I \quad (5.7)$$

Donde:

- L es el largo total de la bobina (altura).
- μ es la permeabilidad magnética del medio. Dado que en este caso es aire, se cumple: $\mu = \mu_0$
- I es la corriente que circula por la bobina, que es el producto de la densidad de corriente por la sección de la bobina.

⁴Capítulo 3, Sección 3.2

Capítulo 5. Transformadores

Operando, se obtiene:

$$B = 31,4 \text{ mT}$$

Se modelan las dos secciones de la bobina en PDETool y se agrega, además, un contorno que envuelve a la misma, con permeabilidad magnética μ_0 y densidad de corriente nula, al cual se le aplican condiciones de borde del tipo Dirichlet.

De esta forma, se da una referencia para el cálculo del vector potencial magnético en el dominio (y posterior cálculo de la densidad de flujo magnético), la cual es coherente con el problema.

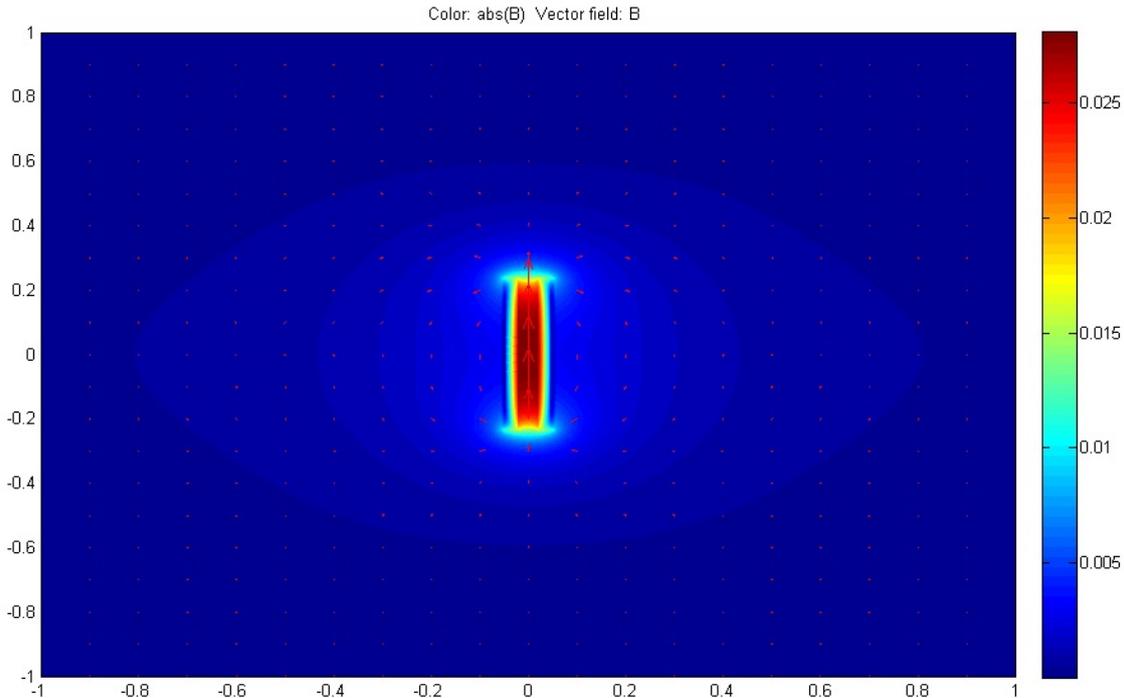


Figura 5.10: Densidad de flujo magnético en Tesla producido por una bobina

En la figura 5.10 se muestran los resultados obtenidos de la simulación en dos gráficas superpuestas. Por un lado, el mapa de color muestra la magnitud de la densidad de flujo magnético en Tesla en todo el dominio, mientras que las flechas muestran el sentido y la dirección de las líneas de campo.

Se verifica que \vec{B} es intenso y constante dentro de la bobina, donde las líneas de campo son paralelas entre sí y a la bobina; y se debilita en el exterior de la misma.

A la sección de la izquierda se le asignó una densidad de corriente positiva y a la derecha una negativa, por lo tanto la corriente es “saliente” de la sección izquierda y “entrante” a la sección derecha, lo que es coherente con el sentido de las flechas en la figura.

Se verifica también que las líneas de campo se cierran sobre sí mismas. El valor de B simulado es cercano a los 30 mT en el interior de la bobina, mientras que el calculado utilizando la Ley de Ampere es de $31,4 \text{ mT}$.

Por lo tanto, se verifica el correcto funcionamiento del software para este caso sencillo.

Problema no lineal

Se considera una de las columnas del transformador presentado y se busca calcular la inducción en el núcleo, a modo de evaluar el funcionamiento del “*nonlinear solver*”.

Al tratarse de un problema no lineal, se debe ingresar la curva de magnetización del hierro, la cual se muestra en la figura 5.6.

5.3. Transformador 250 kVA 15/0,4 – 0,23 kV

Debe reescribirse como $\mu = f(B)$, ya que, como se explicó anteriormente, $|\vec{B}| = |\nabla \vec{A}|$, siendo A la incógnita del problema magnetoestático en PDETool (u).

Para ello, se grafica en Matlab $\mu = f(|\vec{B}|)$ y se le aplica la función *polyfit* de grado 5, la cual devuelve los coeficientes del polinomio de quinto grado que mejor ajusta a la curva, utilizando mínimos cuadrados.

Se obtiene:

$$\mu = 0,1019 |\vec{B}|^5 - 0,4960 |\vec{B}|^4 + 0,8429 |\vec{B}|^3 - 0,6372 |\vec{B}|^2 + 0,2411 |\vec{B}| - 0,0001 \quad (5.8)$$

Para ingresar la curva 5.8 en PDETool, es necesario sustituir $|\vec{B}|$ por

$$\sqrt{u_x^2 + u_y^2}$$

siendo u_x y u_y las componentes según los ejes x e y del escalar u incógnita del problema.

Se agrega además un modelo sencillo de la cuba del transformador, a la cual se le asigna un espesor de 6,4 mm, 1,2 mm y 3,2 mm en sus caras superior, lateral e inferior respectivamente. En cuanto a los parámetros μ y j , se considera una curva de magnetización lineal, con $\mu_r = 1500$ y $j = 0$

A las bobinas de AT y BT se le asignan las densidades de corriente de las ecuaciones 5.5 y 5.6 respectivamente, de forma que las corrientes por ambas tengan sentido opuesto.

El resultado obtenido se muestra en la figura 5.11.

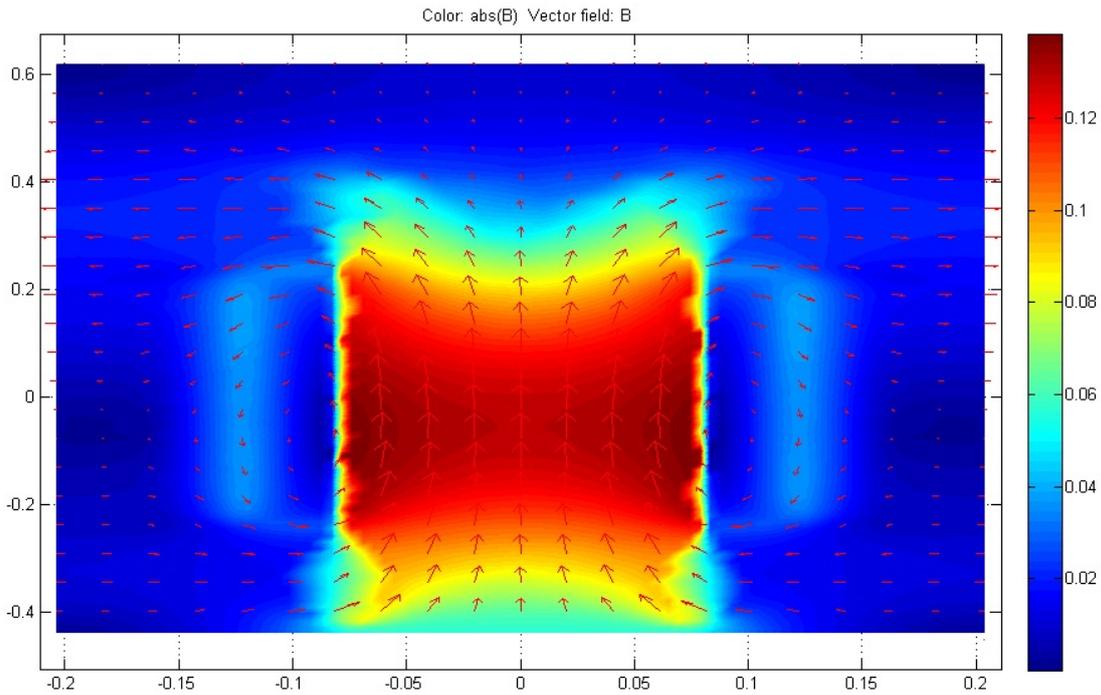


Figura 5.11: Densidad de flujo magnético en Tesla inducido en el núcleo

Se observa un campo intenso en el núcleo, lo cual era esperable debido a las propiedades magnéticas del mismo, así como un campo considerable entre las bobinas como se muestra en 5.2.

Desventajas

Las principales desventajas del software PDETool para la simulación de la densidad de flujo magnético generado por un transformador son:

- **Simetría:** PDETool resuelve únicamente problemas planares. Los cortes correspondientes a la columna de un transformador, debido a la geometría de la misma, deben ser resueltos como problemas con simetría de revolución alrededor de un eje axial (*axisymmetric*).
- **Solución no vectorial:** PDETool devuelve como solución un escalar y no un vector, lo que imposibilita el posterior cálculo del valor RMS de \vec{B} .
- **Exportación de la solución:** PDETool permite exportar únicamente el valor del escalar u , incógnita del problema resuelto, y no el valor que interesa ($\nabla \times \vec{u}$)

FEMM

FEMM es un software diseñado para resolver por el Método de Elementos Finitos, problemas electromagnéticos de baja frecuencia, cuyo dominio Ω puede estar contenido en un plano o poseer simetría de revolución alrededor del eje axial. Se pueden resolver problemas magnéticos estáticos o armónicos en el tiempo (lineales o no lineales), problemas electrostáticos lineales y problemas de flujo de calor en estado estacionario.

Del mismo modo que para PDETool, dado que se desea estudiar la densidad de flujo magnético a frecuencia industrial y ésta permite considerar lentas las variaciones de flujo, se plantea en FEMM la resolución de problemas magnetoestáticos no lineales a través de las ecuaciones de Maxwell ⁵.

Las magnitudes que se desean hallar son RMS, lo cual no es posible empleando únicamente FEMM. Por esta razón, se desarrolla una interfaz con Matlab, la cual permite asignar valores para la simulación en FEMM, realizar el análisis, obtener los resultados, almacenarlos y procesarlos para calcular el valor RMS. Esto se puede lograr de manera sencilla, puesto que existe una herramienta de Matlab llamada *OctaveFEMM*, con la cual se puede operar FEMM utilizando un conjunto de funciones de Matlab.

Dado que se trata de un software 2D, no es posible modelar un transformador trifásico, ya que únicamente se podrían considerar las tres columnas si se resolviera un problema planar. Como se mencionó en PDETool, esto no sería correcto, ya que las columnas de los transformadores tienen simetría axial. Por esta razón, se decide considerar una de las columnas del transformador. Se elige entonces resolver el problema con un dominio axisimétrico, que por convención define z como eje axial y r como eje radial, quedando la región de trabajo limitada por $r \geq 0$. Cuando se define el tipo de problema a resolver en FEMM, también es necesario especificar las unidades de longitud en las que se va a trabajar, la frecuencia en Hz (cero para un problema magnetoestático), el criterio de parada para la solución del problema algebraico lineal (linear solver) y el ángulo mínimo para los triángulos de la malla.

El software FEMM está formado por tres bloques de programas. En primer lugar, una interfaz de usuario interactiva, en la cual se puede dibujar la geometría del problema a resolver, definir las propiedades de los materiales que la componen y asignar las condiciones de borde correspondientes. Una vez realizado el análisis y resuelto el problema, en esta interfaz se muestran los resultados gráficamente, en forma de curvas de nivel o mapas de colores. Es posible además obtener el valor de la simulación para puntos arbitrarios, así como graficar distintas cantidades a lo largo del un contorno definido por el usuario. El segundo bloque corresponde al programa encargado de realizar la triangulación del dominio y en el tercer bloque se encuentran los programas que efectivamente resuelven las ecuaciones en derivadas parciales, obteniendo un valor solución del campo para cada punto del dominio.

Si luego de lo presentado en esta sección se desea profundizar en la herramienta, se puede consultar [20].

Para caracterizar la geometría del problema, FEMM permite dibujar nodos y conectarlos mediante segmentos de línea y de arco, delimitando de esta forma los diferentes subdominios. También es posible importar archivos con extensión *.dxf* desde programas CAD.

⁵Capítulo 3, Sección 3.6

5.3. Transformador 250 kVA 15/0,4 – 0,23 kV

Luego de dibujados los diferentes subdominios, llamados bloques por FEMM, se deben definir las propiedades que los caracterizan, como el tipo de material y, si corresponde, la corriente y el número de vueltas. Es posible agrupar diferentes subdominios de manera que a éstos se les puede asignar las mismas características.

Para la elección de los materiales, FEMM cuenta con una biblioteca a la cual el usuario puede acceder, que contiene diversos materiales ya definidos, pudiéndose editarlos si se desea o crear nuevos materiales en los casos que sea necesario.

Para definir un material en FEMM, se debe especificar si su curva de magnetización es lineal o no.

Si es lineal, es necesario asignarle un valor permeabilidad magnética relativa, siendo posible ingresar valores diferentes para las direcciones horizontal y vertical. También es posible ingresar el ángulo de desfase de histeresis en cada dirección, aunque se debe tener en cuenta que no es un dato dado por el fabricante.

Si se elige un material no lineal, se debe ingresar la curva B-H correspondiente, la cual se recomienda que tenga al menos 10 pares de puntos. A partir de los datos ingresados, el programa realiza una interpolación cúbica entre los puntos, por lo que si no se ingresa un número adecuado de datos, se puede tener una curva no representativa. Además, se debe tener en cuenta que FEMM extrapola linealmente la curva si se encuentra con un valor de B/H fuera del rango definido. Esto puede conducir a errores para valores altos de B , ya que el programa puede considerar al material con mayor permeabilidad que la real. Es importante entonces ingresar una cantidad suficiente de valores para obtener resultados precisos. También se puede definir el ángulo máximo de desfase de histéresis, el cual ocurre para la mayor permeabilidad efectiva.

Es posible especificar la coercitividad del material, su conductividad eléctrica y la densidad de corriente para en el material a frecuencia cero.

Además de definir el material con el cual está hecho un bloque, se puede especificar cómo el mismo está armado.

Por ejemplo, si el núcleo del transformador es laminado, es posible indicar la dirección según la cual se lamina, el espesor de las láminas y el factor de llenado.

En cuanto a las corrientes, se deben definir en FEMM, asignándoles un valor y un tipo de circuito: “paralelo” o “serie”. Si se elige “paralelo”, la corriente se dividirá entre todos los bloques a los cuales se le asigne esta corriente. En cambio, si se elige “serie”, el valor de corriente especificado circulará por cada bloque al cual se le asigne.

Para los bloques etiquetados con una corriente “serie”, se puede definir el número de vueltas (positivo o negativo) del mismo, modelando el subdominio como un conductor trenzado, por el cual circula un corriente igual al número de vueltas definido por el valor de la corriente asignada, y de sentido dado por el signo positivo o negativo del número de vueltas.

Esta forma de definir la corriente y el número de vueltas para un bloque facilita la interacción con Matlab, ya que permite asignar a los subdominios que corresponda, las magnitudes de las corrientes que los recorren y el número de vueltas de los mismos. Para ello, es necesario asignar desde la interfaz de FEMM un grupo a cada bloque que transporte corriente y declarar las etiquetas necesarias para dichas corrientes.

Para poder determinar completamente el problema, se deben especificar las condiciones de borde. De manera análoga a PDETool, se deben asignar condiciones de Neumann a los segmentos que representan la interfaz hierro-aire: el núcleo y la cuba. El programa permite elegir de una lista el tipo de condición y luego especificar los valores de los coeficientes que las definen.

Para una condición de borde de Neumann se debe elegir el tipo “Mixed”, que cumple la siguiente ecuación $\left(\frac{1}{\mu_0\mu_r}\right)\frac{\delta A}{\delta n} + c_0A + c_1 = 0$ y asignarle a las constantes el valor cero.

El Método de Elementos Finitos requiere que los problemas se resuelvan en un dominio acotado, por lo que en FEMM se debe delimitar totalmente la región donde se desea obtener la solución y a la

frontera de la misma también se le imponen condiciones de borde.

Para problemas de “frontera abierta”, los cuales se desean resolver en un espacio sin bordes, FEMM tiene la opción de aproximar un dominio no acotado. La condición de borde ideal asociada a estos problemas sería $A = 0$ para $r = \infty$. FEMM modela el dominio no acotado creando una estructura de frontera que emula en forma precisa la impedancia de un dominio sin bordes. Para profundizar en esta funcionalidad se sugiere consultar [20].

Para poder resolver el problema modelado se procede a aplicar una malla que divide el dominio en pequeñas particiones triangulares.

Para hallar el valor RMS de la densidad de flujo magnético, se ejecuta FEMM desde Matlab para diferentes instantes de tiempo dentro de un período, cambiando el signo del número de vueltas de los bloques correspondientes a las bobinas según corresponda. Para cada simulación, se almacenan las componentes r y z de \vec{B} para cada punto del dominio, de forma de calcular primero el valor RMS de cada componente en un período y , finalmente, el valor RMS total.

5.4. Modelado del transformador

A continuación, se presentan los modelos del transformador con simetría de revolución según el eje axial, desarrollados para su posterior simulación en FEMM.

En todos los modelos se consideran dos cortes del transformador, tanque y ventana, los cuales se muestran en la figura 5.12.

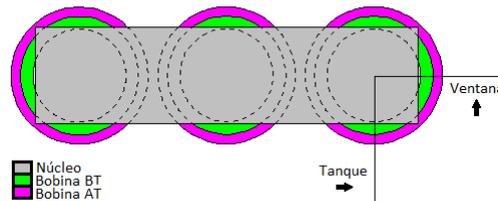


Figura 5.12: Cortes de la columna del transformador considerados

En el corte tanque BT se toma en cuenta el apilado BT del núcleo, la cuba y su distancia a la parte activa y la dimensión de las bobinas en ese corte, que por lo general tiende a ser mayor. Esto último se debe a que el conexionado de baja tensión podría tener barras para las salidas de la bobina en el principio, el final y las derivaciones si corresponde. En estos casos, como las barras no tienen un eje de rotación, se decide quitarlas del modelo, provocando que en el mismo la bobina de baja tensión quede dividida en varias partes.

De forma análoga al corte anterior, en AT se toma en cuenta su apilado respectivo del núcleo, la cuba y su distancia a la parte activa y la dimensión de las bobinas en ese corte. En este lado se encuentran las salidas de la bobina de AT, las cuales se realizan con los mismos conductores que la bobina, manteniendo la forma circular de la misma. Esto se debe a que la corriente es lo suficientemente pequeña para prescindir del conductor de folio, el cual requiere del agregado de barras para las salidas.

5.4.1. Hipótesis primer modelo

Como primera aproximación, se desprecia la cuba y, por lo tanto, su efecto en el valor y la distribución de la densidad de flujo magnético alrededor del transformador.

Se considera únicamente el escalón del núcleo con la chapa más ancha, ingresándose en FEMM el valor del espesor de las láminas que lo forman.

5.4. Modelado del transformador

Ya que el programa permite definir materiales y adjudicarle propiedades, se le asigna al núcleo de hierro silicio de grano orientado la curva B-H de la figura 5.6.

En cuanto a la parte activa, se desprecian los ductos entre capas de las bobinas y no se dibujan tubos ni cabeceras de material aislante. Tampoco se toma en cuenta el conexionado interior a la cuba, los aisladores y los cables conectados a los mismos, de forma tal de analizar la contribución del transformador de manera aislada.

Para los tres cortes, el modelo a dibujar en FEMM es el que se muestra en la figura 5.13, con las dimensiones correspondientes.

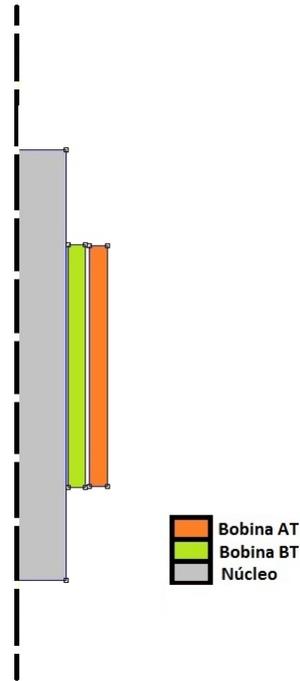


Figura 5.13: Representación del primer modelo

Se ejecuta el programa FEMM desde Matlab suponiendo el transformador con carga nominal, obteniéndose un gráfico del valor RMS de la densidad de flujo magnético (B) en los alrededores del mismo, como se muestra en la figura 5.14.

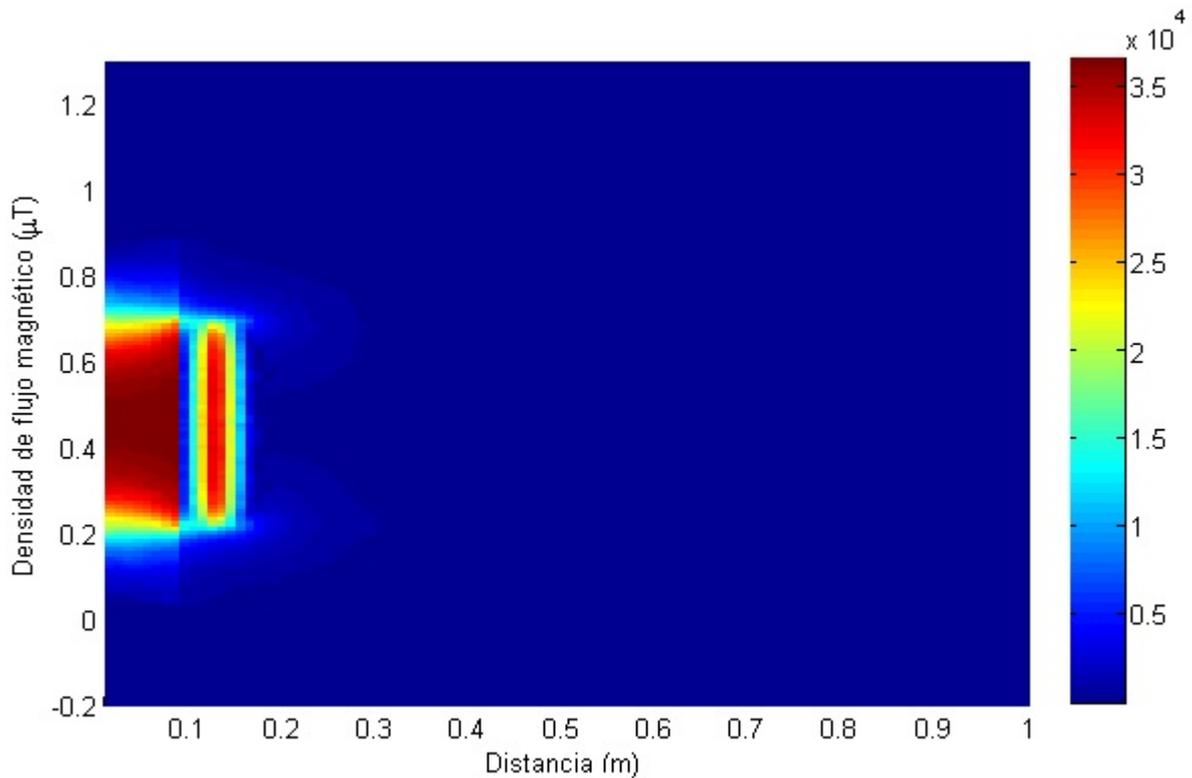


Figura 5.14: Gráfico de densidad de flujo magnético alrededor del transformador obtenido de CEDIMET

Para validar este modelo, se realizan medidas experimentales como se detalla a continuación.

5.4.2. Relevamiento de campo magnético

Los transformadores se ensayaron dentro del laboratorio de la empresa que prestó sus diseños, con todos los datos constructivos que permitieron la investigación y creación de modelos⁶.

Procedimiento

Inicialmente se toman medidas a la mitad de la altura del transformador, con éste des-energizado, a modo de obtener un estimativo del ruido del medio. Las mismas se relevan según el esquema de la figura 5.15.

⁶Empresa de transformadores Partiluz S.A. - Montevideo Uruguay

5.4. Modelado del transformador

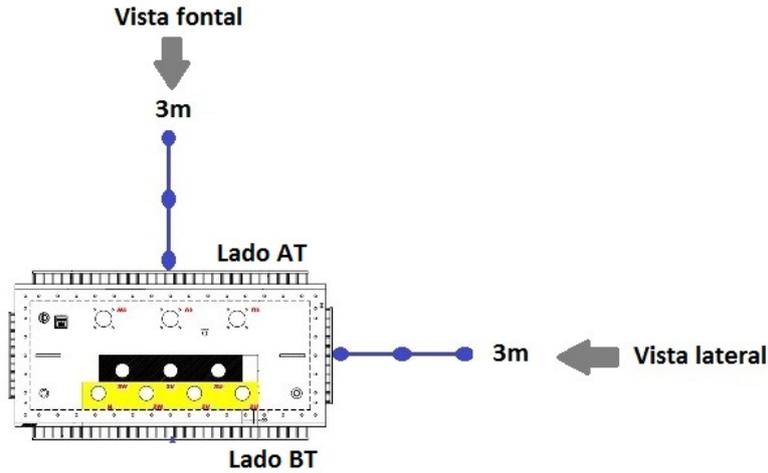


Figura 5.15: Vista superior de las medidas a tomar

En los alrededores del transformador, el valor del ruido oscila entre un valor máximo y un mínimo, mostrados en la tabla 5.2.

Ruido máximo (nT)	Ruido mínimo (nT)
200	100

Tabla 5.2: Medidas del ruido magnético del medio a 50Hz

Luego se inicia el proceso de energización del transformador, el cual se somete a ensayo de cortocircuito. Para eso, se cortocircuitan los bornes de 400 V y se hace circular la corriente nominal.

Las medidas se realizan desde las distancias de seguridad mínimas permitidas y están limitadas por las dimensiones de la instalación. En la tabla 5.3 se muestran los resultados obtenidos.

DISTANCIA (m)	FRENTE AT		LATERAL	
	Min	Max	Min (μ T)	Max (μ T)
0	50	60	45	47
1	3,8	4	1,5	1,6
2	0,998	1		

Tabla 5.3: Medidas de densidad de flujo magnético en ensayo de cortocircuito del transformador 250 kVA 15/0, 4–0, 23 kV

Dado que las medidas fueron tomadas en el horario laboral de la fábrica, no se pudo medir a distancias más lejanas del transformador. De todas formas, como a una distancia de un metro el campo caía de manera abrupta, alejarse en demasía implicaba confundir la medida con ruido.

Comparación de los resultados

En la tabla 5.4, se observan las desviaciones entre los resultados obtenidos a partir de CEDIMET con el primer modelo y las medidas realizadas en el frente del transformador del lado AT (vista tanque). De forma análoga, en la tabla 5.5 se comparan los resultados para el lateral del transformador (vista ventana). Cabe destacar que las medidas pegadas al transformador se comparan con los valores simulados a una distancia igual a la profundidad de las aletas correspondientes.

Capítulo 5. Transformadores

Medidas		CEDIMET			Comparación		
Distancia (m)	Campo MAX (μT)	Campo MIN(μT)	Campo (μT)	Desviación MAX (μT)	Desviación MIN (μT)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	50	60	159	109	99	218	165
1	3,8	4	4,3	0,5	0,3	13	8
2	0,998	1	0,84	0,158	0,160	16	16

Tabla 5.4: Vista frontal - Primer modelo

Medidas		CEDIMET			Comparación		
Distancia (m)	Campo MAX (μT)	Campo MIN(μT)	Campo (μT)	Desviación MAX (μT)	Desviación MIN (μT)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	45	47	360,9	315,9	313,9	702	667,9
1	1,5	1,6	5,6	4,1	4	273	250

Tabla 5.5: Vista lateral - Primer modelo

5.4.3. Hipótesis segundo modelo

Para el primer modelo, el cual no considera la cuba, se obtuvieron valores de densidad de flujo magnético simulado alrededor del transformador muy por encima de los medidos. Esto refleja que la cuba del transformador, como se explicó en la sección 5.1.1, influye en dichos valores, dado que, al tener mejores propiedades magnéticas que el aire, ofrece un camino de menor reluctancia para las líneas de flujo. Es esperable entonces que, al agregar la cuba al modelo, los valores simulados disminuyan. Además, se puede destacar que la curva de magnetización de la cuba es lineal para los valores de B-H involucrados. Si no lo fuera, los valores medidos y simulados debieran ser del orden, ya que al alcanzar la saturación, la permeabilidad magnética decae hasta un valor similar a la del vacío, como se muestra en la figura 5.16.

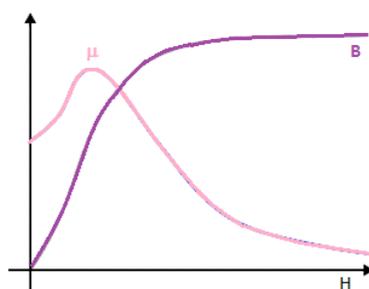


Figura 5.16: Curvas B-H y μ -H

En este segundo modelo, se considera la cuba del transformador. La misma está hecha de acero, material para el cual se considera una curva de magnetización lineal por lo explicado anteriormente. Se le asigna una permeabilidad magnética relativa de 1500 (valor encontrado para el hierro industrial), suponiendo un valor significativamente mayor a 1 pero a su vez mucho menor a la del núcleo, la cual ronda los 30000 en el punto de funcionamiento.

Aunque el transformador es de cuba aleteada, como se puede observar en la figura 5.8, se la asume lisa de espesor uniforme en todas las direcciones, del mismo espesor del fondo (3,2 mm).

De esta forma, el modelo a dibujar en FEMM es el de la figura 5.17.

5.4. Modelado del transformador

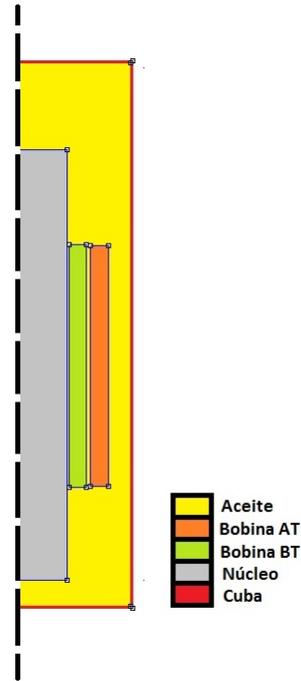


Figura 5.17: Representación del segundo modelo

En las tablas 5.6 y 5.7 se muestran los resultados obtenidos y las comparaciones pertinentes, para ambos cortes del transformador. En la figura 5.18 se expone el gráfico de la simulación en la vista frontal.

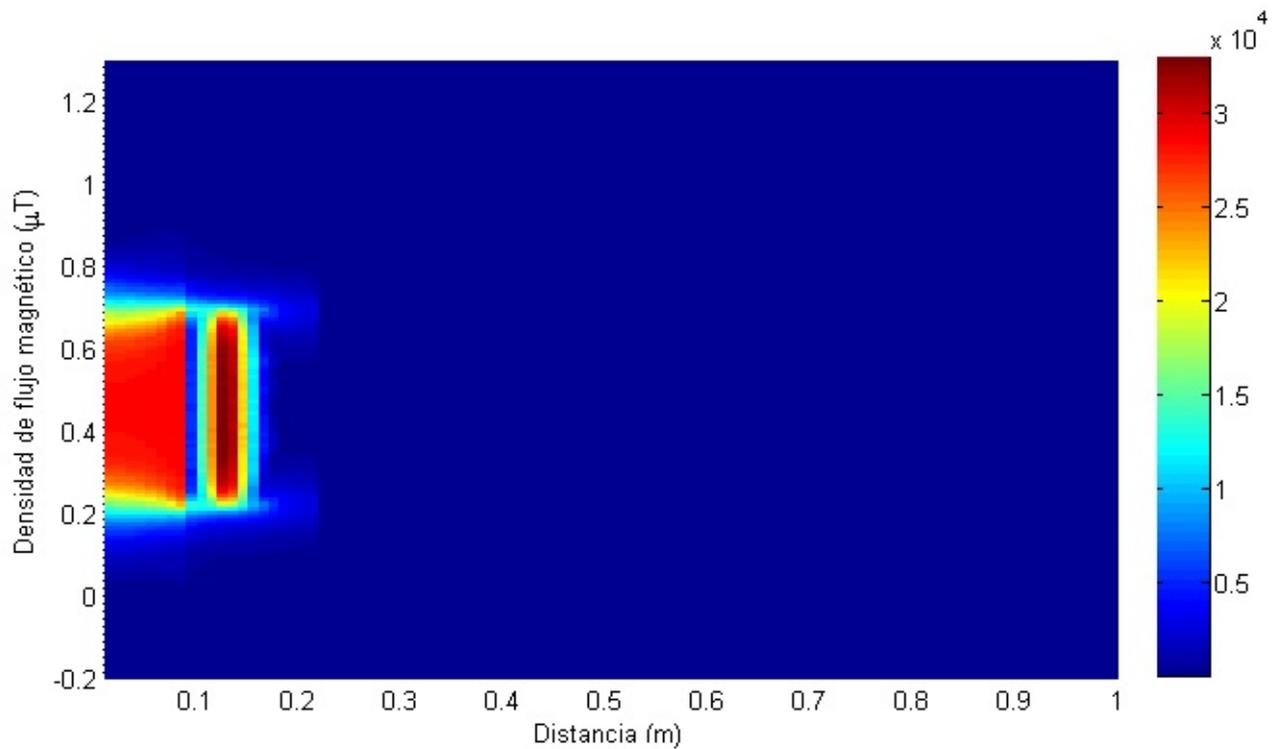


Figura 5.18: Gráfico de densidad de flujo magnético alrededor del transformador para el segundo modelo obtenido de CEDIMET

Capítulo 5. Transformadores

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μ T)	Campo MIN(μ T)	Campo (μ T)	Desviación MAX (μ T)	Desviación MIN (μ T)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	50	60	24	26	36	51	60
1	3,8	4	1	2,7	2,9	72	74
2	0,998	1	0,2373	0,761	0,763	76	76

Tabla 5.6: Vista frontal - Segundo modelo

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μ T)	Campo MIN(μ T)	Campo (μ T)	Desviación MAX (μ T)	Desviación MIN (μ T)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	45	47	47	2	0	4	0
1	1,5	1,6	1,5	0	0,1	0	6,3

Tabla 5.7: Vista lateral - Segundo modelo

A partir de la comparación, se decide realizar un modelo más detallado de la cuba, con el fin de observar el impacto de la variación del espesor de la misma en el resultado.

5.4.4. Hipótesis tercer modelo

Se cambia el segundo modelo, dejándose de considerar una cuba de espesor uniforme. Se definen el fondo, la tapa y los ángulos en los que esta última se apoya. En cuanto a las aletas, se supone que la mayoría de las líneas de campo se cierran por el camino de menor reluctancia, siendo este la zona de la aleta más próxima a la parte activa. Esto es igual a no considerar la aleta pero sí su espesor, como se puede observar en la figura 5.19.

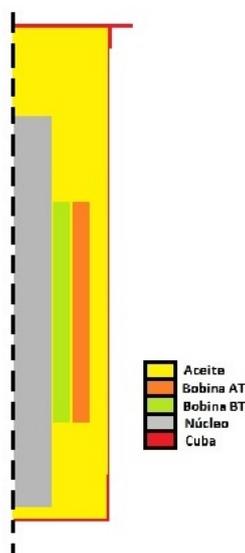


Figura 5.19: Representación del tercer modelo

En la tabla 5.8 se realiza la comparación con las medidas realizadas en el frente del transformador del lado de AT así como en la figura 5.20 se encuentra el gráfico obtenido a partir de la simulación y en la tabla 5.9 las del lateral del mismo.

5.4. Modelado del transformador

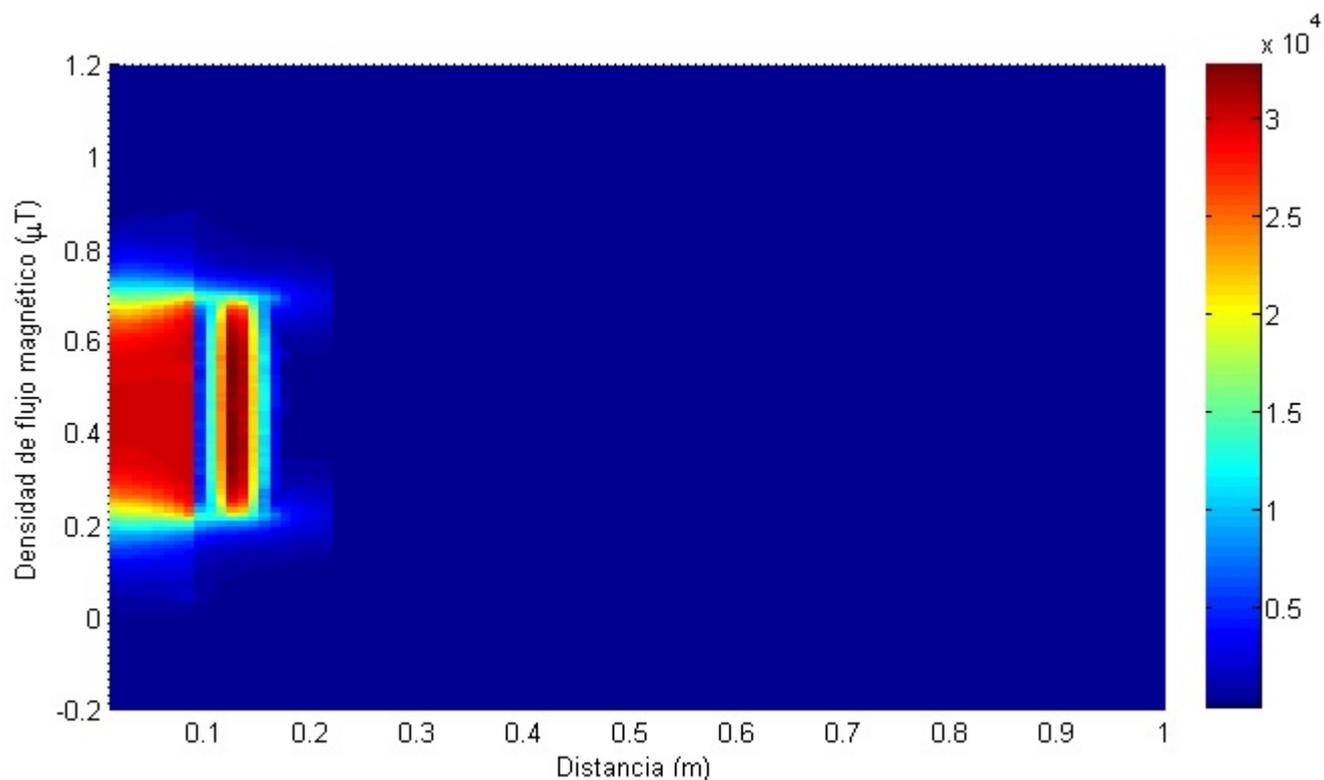


Figura 5.20: Gráfico de densidad de flujo magnético alrededor del transformador para el tercer modelo obtenido de CEDIMET

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μT)	Campo MIN (μT)	Campo (μT)	Desviación MAX (μT)	Desviación MIN (μT)	error relativo MAX (%)	error relativo MIN (%)
0	50	60	48	2	12	4	20
1	3,8	4	2,2	1,6	1,8	42	45
2	0,998	1	0,47	0,528	0,53	53	53

Tabla 5.8: Vista frontal - Tercer modelo

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μT)	Campo MIN (μT)	Campo (μT)	Desviación MAX (μT)	Desviación MIN (μT)	error relativo MAX (%)	error relativo MIN (%)
0	45	47	101	56	54	124	115
1	1,5	1,6	2,9	1,4	1,3	93	81

Tabla 5.9: Vista lateral - Tercer modelo

Se encuentra una fuerte relación entre el espesor de la chapa de la cuba y el campo que escapa de la misma. Al reducirlo a casi un 40% el campo se duplicó.

En cuanto a los valores calculados para la densidad de campo magnético en el frente del transformador del lado de AT, se puede observar una disminución de los errores relativos al pasar del primer modelo al segundo. Por el contrario, esto no sucede en el lateral del mismo, donde los errores aumentan.

A partir de los resultados, se decide realizar un cuarto modelo en el cual se intenta plasmar el efecto de las aletas.

5.4.5. Hipótesis cuarto modelo

Al igual que en el modelo anterior, se considera que la mayoría del campo que escapa, se cierra por la zona de las aletas más cercana a la parte activa. En la figura 5.21 se observa un esquema de la vista superior de las aletas. Se intenta representar el efecto lateral de las mismas sobre el campo saliente. Se asume que parte del campo que logra escapar, se cierra por ellas, a lo largo de toda su profundidad.

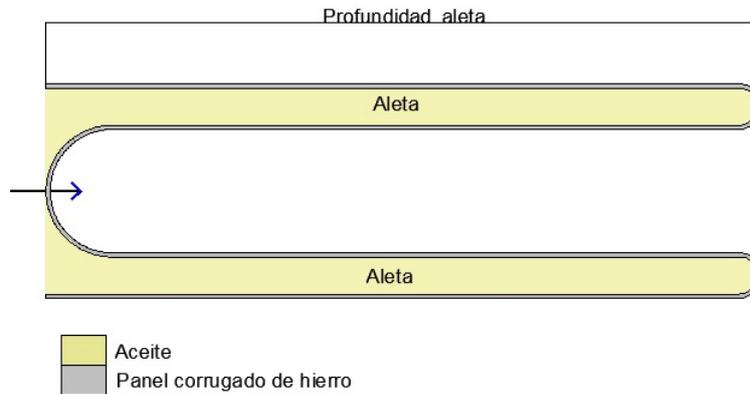


Figura 5.21: Detalle flujo de fugas frente a laterales de aleta

El modelo se resuelve agregando otro apantallamiento como se muestra en la figura 5.22. Este es igual a realizar un corte longitudinal de la aleta, por lo que se ubica en el mismo lugar que las mismas y tiene su ancho, largo y espesor de chapa. De forma análoga a los otros modelos, en las tablas 5.10 y 5.11 se exponen los resultados de la comparación con las mediciones realizadas, así como en la figura 5.23 se muestra el gráfico simulado.

Cabe destacar que en este caso, al estar la aleta del transformador modelada con sus dimensiones reales, la comparación se realiza con los valores obtenidos con CEDIMET a 0, 1 y 2 metros del modelo respectivamente.

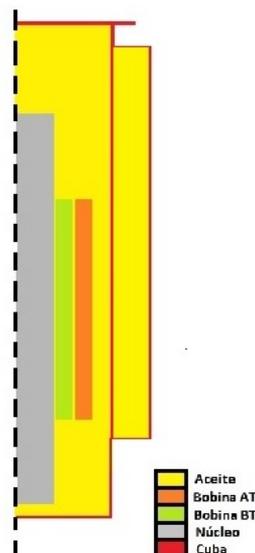


Figura 5.22: Representación del cuarto modelo

5.4. Modelado del transformador

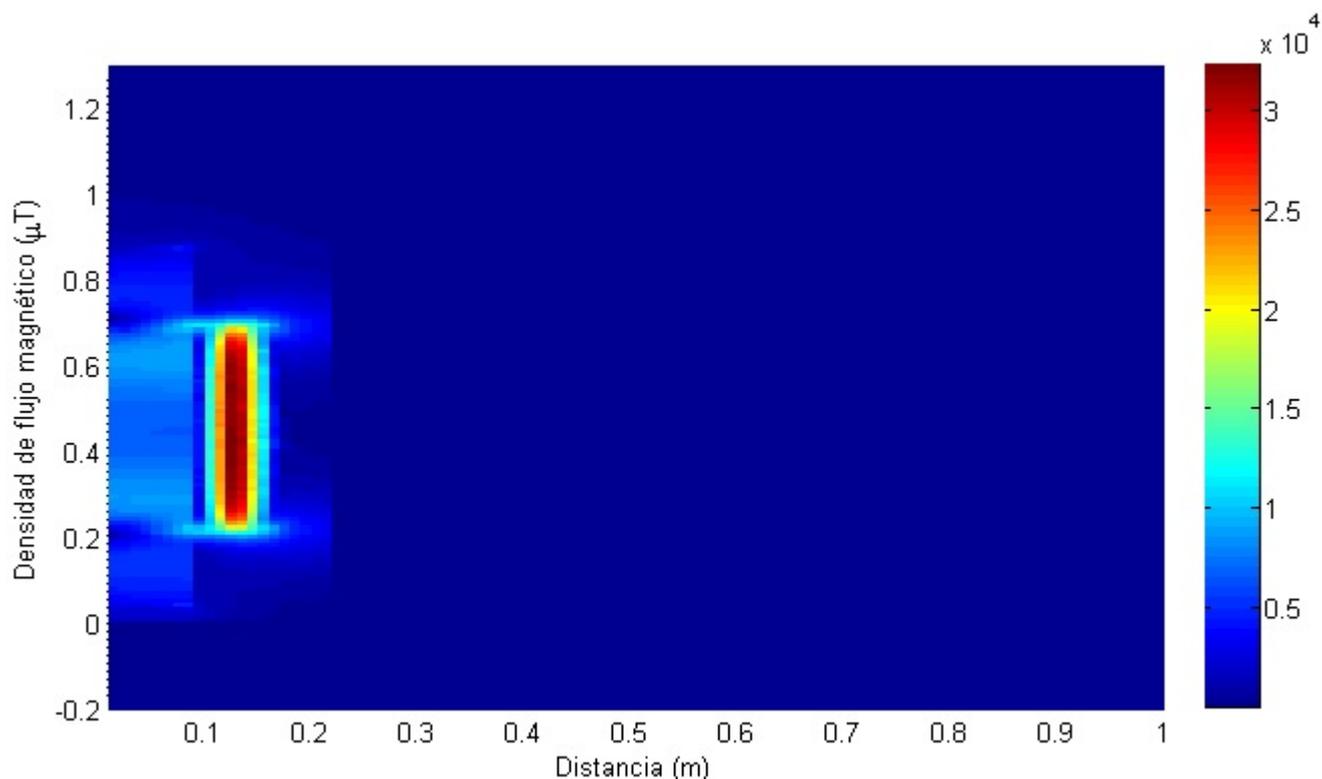


Figura 5.23: Gráfico de densidad de flujo magnético alrededor del transformador para el cuarto modelo obtenido de CEDIMET

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μT)	Campo MIN(μT)	Campo (μT)	Desviación MAX (μT)	Desviación MIN (μT)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	50	60	50	0	10	0	17
1	3,8	4	3,2	0,6	0,8	16	20
2	0,998	1	0,66	0,338	0,34	34	34

Tabla 5.10: Vista frontal - Cuarto modelo

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μT)	Campo MIN(μT)	Campo (μT)	Desviación MAX (μT)	Desviación MIN (μT)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	45	47	43	2	4	4	9
1	1,5	1,6	1,8	0,3	0,2	20	13

Tabla 5.11: Vista lateral - Cuarto modelo

Del pasaje del tercer modelo al cuarto, se presenta una disminución de los errores relativos para todos los lados del transformador.

El segundo apantallamiento implica una reducción de la fuga de campo magnético afuera de la cuba.

5.5. Análisis de los resultados

Como se explicó anteriormente, el primer modelo se descarta, ya que la cuba es un elemento clave, tanto en el valor como en la distribución de la densidad de flujo en los alrededores del transformador.

El segundo modelo realizado fue una primera aproximación del efecto de la cuba, al considerarla de espesor uniforme y del mismo valor que su fondo. En cambio, el tercer modelo incorpora las dimensiones reales de la misma, pero desprecia el efecto de las aletas. Por último, el cuarto modelo busca incorporar las aletas, dentro de las limitaciones de un software en dos dimensiones.

Para las simulaciones de estos últimos tres modelos, se observa que las mayores densidades de flujo magnético se presentan en el núcleo del transformador, entre los arrollamientos primario y secundario, y en la cuba, acorde con lo visto en 5.1.1. En la simulaciones de las figuras 5.18, 5.20 y 5.23 no se logra visualizar el campo intenso en la cuba, debido a que el espesor de ésta es menor al paso con el cual se realizó la corrida. Por lo tanto, para mostrar con mayor detalle la distribución de B , en la figura 5.24 se presenta el valor RMS de la densidad de flujo magnético a lo largo del eje radial del transformador, para el tercer y cuarto modelo.

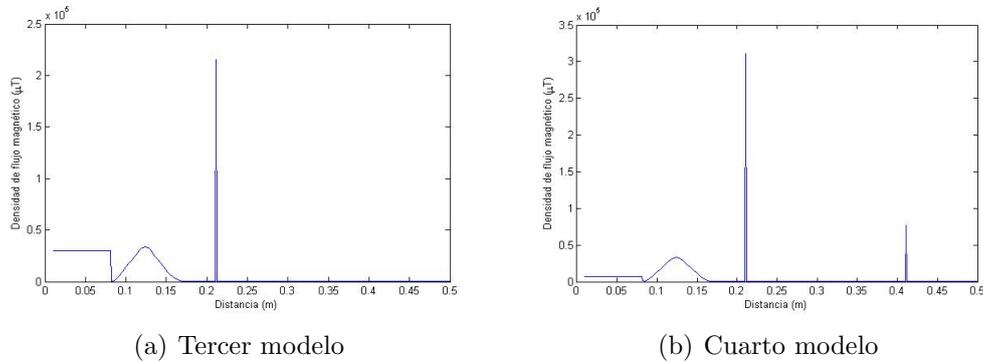


Figura 5.24: Distribución de la densidad de flujo magnético a lo largo del eje radial

Para los tres modelos que consideran la cuba, comparando los resultados para el frente del transformador, se puede observar una mejora progresiva a medida que se aumenta el nivel de complejidad de la cuba del modelo. Por el contrario, esto no ocurre en el lateral, donde el segundo es el que mejor ajusta, luego el cuarto y por último el tercero, que se aleja lo suficiente para considerarlo inapropiado.

De las distintas simulaciones realizadas se puede destacar el efecto de las aletas en la densidad de flujo magnético y la necesidad de un buen modelado de las mismas para la obtención de simulaciones confiables.

Globalmente, el cuarto modelo es el que presenta los menores errores y, dada la limitación del software en dos dimensiones para un mejor modelado de las aletas, se lo elige.

Una vez elegido el modelo, se procede a evaluarlo para otros dos transformadores que también fueron ensayados y relevados.

Se tuvo acceso al detalle constructivo de un transformador de 2300 kVA y relación de transformación 20/0, 41 kV y de un transformador de 2700 kVA y relación de transformación 31, 5/0, 66 kV , de características similares al de 250 kVA considerado anteriormente.

Para ambos, se realizan las simulaciones correspondientes al modelo elegido y se comparan los resultados obtenidos con las mediciones relevadas experimentalmente. Dicha comparación se presenta en las tablas 5.12 y 5.13 para el transformador de 2300 kVA y en las tablas 5.14 y 5.15 para el de 2700 kVA . En este último, el ensayo de cortocircuito realizado para el relevamiento de las medidas, fue al 50% de su corriente nominal. Esto fue debido a la limitación de los equipos empleados en el mismo

5.5. Análisis de los resultados

para entregar la corriente nominal. Se considera que la distancia cero corresponde a los valores a 5 cm de las aletas, dado que fue a esta distancia que se realizaron las medidas.

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μ T)	Campo MIN(μ T)	Campo (μ T)	Desviación MAX (μ T)	Desviación MIN (μ T)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	71	58	68	3	10	4	17
1	29	14	9,7	19,3	4,3	67	31
2	6	4	2,4	3,6	1,6	60	40

Tabla 5.12: Transformador 2300 kVA - Vista frontal

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μ T)	Campo MIN(μ T)	Campo (μ T)	Desviación MAX (μ T)	Desviación MIN (μ T)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	90	88	67	23	21	26	24
1	10	14	9	1	5	10	36
2	6	4	2,3	3,7	1,7	61,7	43

Tabla 5.13: Transformador 2300 kVA - Vista lateral

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μ T)	Campo MIN(μ T)	Campo (μ T)	Desviación MAX (μ T)	Desviación MIN (μ T)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	43	41	23	20	18	47	44
1	6	6	3,6	2,4	2,4	40	40
2	2	2	0,99	1,01	1,01	50	50

Tabla 5.14: Transformador 2700 kVA - Vista frontal

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μ T)	Campo MIN(μ T)	Campo (μ T)	Desviación MAX (μ T)	Desviación MIN (μ T)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	38	33	47	9	14	24	42
1	8	7	5	3	2	37	29
2	1,5	1,4	1,2	0,3	0,2	20	14

Tabla 5.15: Transformador 2700 kVA - Vista lateral

Es importante destacar que estos transformadores, al igual que el de 250 kVA considerado anteriormente, tienen grupo de conexión Dyn11, por lo que se tuvo en cuenta en las simulaciones que $I_{bobina AT} = \frac{I_{línea}}{\sqrt{3}}$

Se observa que, en general, los errores aumentan al alejarse del transformador, lo que ocurre debido a que las medidas caen con distinto exponente que la simulación. Si se toma para cada transformador el promedio de los valores máximo y mínimo medidos a un metro y se determina el exponente con el cual caen al valor correspondiente a dos metros, para todos los casos dicho exponente se encuentra entre 1,6 y 2,1 para la vista frontal y entre 1,3 y 2,4 para la vista lateral. Realizando el mismo cálculo para los valores simulados, los exponentes varían entre 1,9 y 2,3 para la vista frontal y vale 2 para la vista lateral.

Igualmente, si bien los errores que se obtienen son grandes, se encuentran dentro de lo esperado. Según Iberdrola, empresa española dedicada a la producción, distribución y comercialización energética, “la trazabilidad de las simulaciones del campo magnético se ve influenciada en gran medida por elementos o circunstancias que llevan inherente un alto grado de incertidumbre y que son impredecibles a la hora de realizar las simulaciones, lo que debe justificar, en parte, unas desviaciones de hasta un 40% que han sido detectadas en simulaciones – mediciones realizadas hasta la fecha.”

Capítulo 5. Transformadores

Si bien el porcentaje de 40% es inherente al modelado realizado por la empresa, los parámetros conocidos y considerados, y al software con el cual se realiza la simulación, es del orden de las desviaciones obtenidas.

Es importante tener en cuenta que, al estar todos los transformadores medidos bajo condiciones de ensayo de cortocircuito, existe un campo generado por la barra que cortocircuita las tres fases, por la cual circula la corriente nominal de baja tensión. El ensayo de cortocircuito tiene como ventaja que permite medir el campo generado por el transformador, sin considerar el aporte de la acometida de baja tensión, la cual se espera genere un campo de magnitud considerable debido a las altas corrientes y la separación entre las fases. De todas formas, el campo generado por la barra puede llegar a ser del orden del medido, por lo que si bien el modelo elegido ajusta a las condiciones del ensayo, interesa ver el aporte de la barra y la superposición de ambos campos.

Para ello, existen dos grandes limitaciones dadas por el software con el cual se dispone. La principal, tiene que ver con la imposibilidad de realizar una superposición vectorial de los dos campos simulados (barra y transformador) para compararla con los valores medidos. Si bien para la barra es posible simular el campo vectorial en tres dimensiones con el programa desarrollado para líneas, para el transformador se pueden obtener únicamente los resultados en un plano.

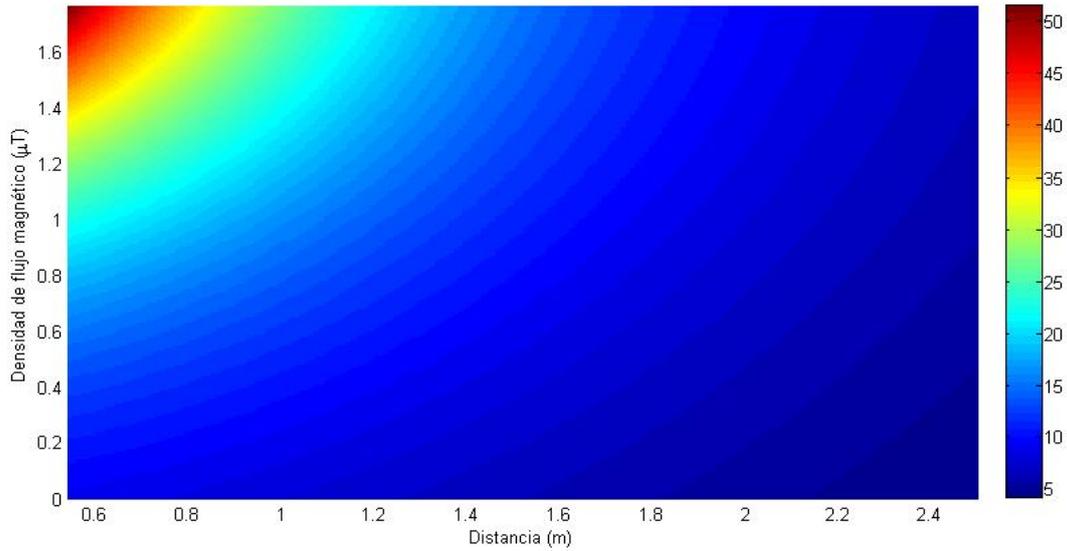
La segunda es la imposibilidad de modelar el campo generado por la barra que se cierra por la cuba del transformador, especialmente por su tapa, ya que como se vio anteriormente la misma actúa como un blindaje.

Teniendo en cuenta esto, se decide igualmente realizar una simulación para la vista frontal del transformador, ya que la barra con la cual se cortocircuitan los bornes se coloca paralela a dicha vista y, por lo tanto, el campo generado por la misma se encuentra principalmente contenido en un plano perpendicular a ella.

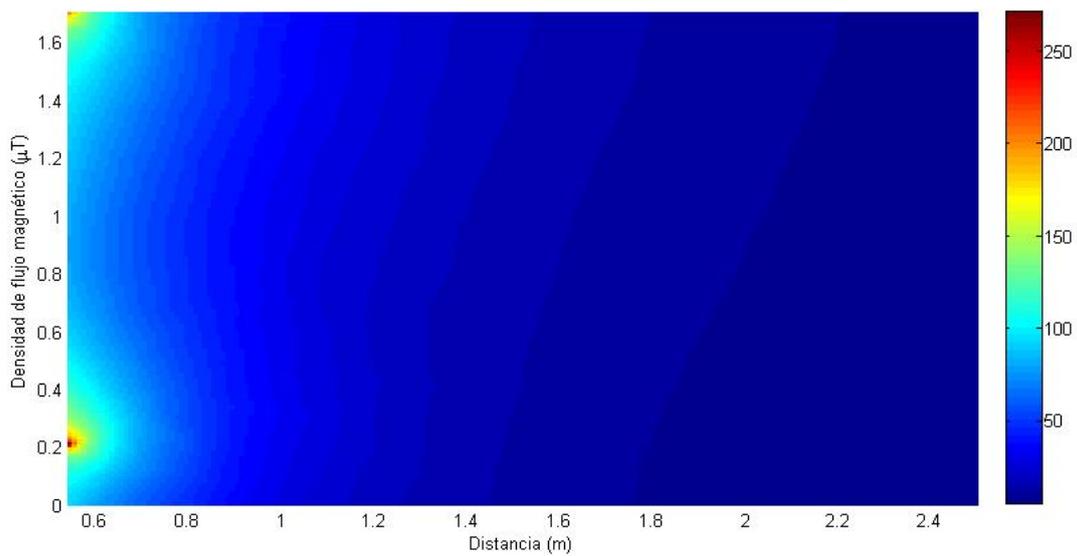
En primer lugar se simula únicamente la densidad de flujo magnético generado por la barra en un plano correspondiente a la vista tanque del transformador, para luego realizar la superposición y encontrar el valor RMS del B total, el cual se calcula para las dos componentes del plano considerado.

Las simulaciones se realizan para el transformador de 2300 kVA y se muestran en la figura 5.25.

5.5. Análisis de los resultados



(a) Tercer Modelo



(b) Cuarto Modelo

Figura 5.25: Distribución de la densidad de flujo magnético a lo largo del eje radial

Como se observa en la figura 5.25(a), efectivamente el valor del campo generado por la barra es del orden de lo medido en el ensayo de cortocircuito. Para la altura a la cual se realizaron las mediciones y pegado al transformador, B vale alrededor de $20 \mu T$. Sin embargo, como muestra la figura 5.25(b), al superponerlo con el campo generado por el transformador, la suma vectorial en dos dimensiones provoca que el campo total sea muy similar al que se obtiene considerando únicamente el transformador, siendo el valor pegado al mismo de $79 \mu T$.

En cuanto a los terminales de alta tensión, por los cuales se alimenta al transformador para el ensayo, se realizó una simulación teniendo en cuenta disposición geométrica de los cables y las corrientes por lo mismos. Se encontró que generan un campo del orden de $1 \mu T$ en el punto medido pegado al transformador y considerando el campo en los tres ejes, por lo que se desprecian.

Para continuar con el análisis, se decide considerar otro aspecto importante de la cuba. Dado que ya se realizó un modelado de la misma en cuanto a su forma, ahora se considera otro parámetro fundamental y cuyo valor exacto es desconocido: la permeabilidad magnética.

5.5.1. Permeabilidad magnética de la cuba

Para un modelo más preciso, es necesario conocer el valor de la permeabilidad magnética de la cuba. En un principio se estimó un valor mucho mayor a 1 pero mucho menor a la permeabilidad magnética relativa del núcleo y se eligió un valor sugerido para hierro comercial.

Las empresas que proveen de cubas a la fábrica de transformadores desconocen ese dato, ya que el conocimiento del mismo no se encuentra dentro de los ensayos de calidad que ellos garantizan. Dentro de estos se encuentran la composición química del material, un ensayo de estanqueidad de la cuba y el análisis mecánico donde se evalúa la elasticidad, resistencia a la tracción, etc.

Está hecha de acero y éste es una aleación cuyos componentes no son siempre los mismos, ya que dependen de las necesidades constructivas y funcionales del material a fabricar. Esto hace que el encontrar esta información a partir de otra fuente no sea confiable, a menos que se conozca la composición química del material y esta sea idéntica.

Se encontraron artículos [21] que sugieren métodos prácticos para el cálculo de un valor aproximado con ensayos sobre una muestra del material, pero excede el alcance del proyecto.

Por esta razón, se decide utilizar un método iterativo partiendo del valor que se tomó inicialmente para la realización del modelo en la sección anterior. Se observa que en los casos anteriores, los valores calculados por CEDIMET se encuentran por debajo de los medidos o considerablemente más cercanos al mínimo que al máximo. Dado que, un valor menor de permeabilidad magnética implica que disminuye la capacidad para atraer campos magnéticos hacia su interior, aumentando la densidad de flujo magnético en las afueras del transformador, se comienza la iteración con un valor menor. En las tablas 5.16 y 5.17 se expone la comparación de los resultados del cuarto modelo del 250 kVA estudiado con las mediciones realizadas.

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μ T)	Campo MIN(μ T)	Campo (μ T)	Desviación MAX (μ T)	Desviación MIN (μ T)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	50	60	54	4	6	8	10
1	3,8	4	3,5	0,3	0,5	8	12,5
2	0,998	1	0,7	0,298	0,3	30	30

Tabla 5.16: Frente del transformador - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1400

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μ T)	Campo MIN(μ T)	Campo (μ T)	Desviación MAX (μ T)	Desviación MIN (μ T)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	45	47	46	1	1	2	2
1	1,5	1,6	1,9	0,4	0,3	27	19

Tabla 5.17: Lateral del transformador - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1400

Los valores simulados aumentaron y se encuentran en la mitad del intervalo medido pegado al transformador, lo que puede ser adecuado para un software diseñado con el objetivo de estimar la densidad de flujo de magnético en un transformador.

Dado que el interés del proyecto yace en estimar los peores casos con el fin de cumplir con los niveles de exposición, es necesario realizar otra iteración buscando que los resultados obtenidos a partir de CEDIMET se encuentren próximos a la medición máxima.

En las tablas 5.18 y 5.19 se muestran los resultados utilizando una permeabilidad magnética relativa en la cuba de 1350.

5.5. Análisis de los resultados

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μT)	Campo MIN(μT)	Campo (μT)	Desviación MAX (μT)	Desviación MIN (μT)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	50	60	54	4	6	8	10
1	3,8	4	3,5	0,3	0,5	8	12,5
2	0,998	1	0,7	0,298	0,3	30	30

Tabla 5.18: Frente del transformador - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1350

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μT)	Campo MIN(μT)	Campo (μT)	Desviación MAX (μT)	Desviación MIN (μT)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	45	47	47	2	0	4	0
1	1,5	1,6	1,9	0,4	0,3	27	19

Tabla 5.19: Lateral del transformador - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1350

En cuanto a los valores en el frente del transformador se puede observar que resultan iguales tanto para 1400 como para 1350. Esto no ocurre en el lateral, donde pegado al transformador alcanza el máximo medido y a un metro se excede.

Se procede iterando nuevamente, con un valor de permeabilidad magnética relativa de 1300 y se muestran los resultados en las tablas 5.20 y 5.21.

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μT)	Campo MIN(μT)	Campo (μT)	Desviación MAX (μT)	Desviación MIN (μT)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	50	60	56	6	4	12	7
1	3,8	4	3,7	0,1	0,3	3	7,5
2	0,998	1	0,7	0,298	0,3	30	30

Tabla 5.20: Frente del transformador - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1300

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μT)	Campo MIN(μT)	Campo (μT)	Desviación MAX (μT)	Desviación MIN (μT)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	45	47	49	4	2	9	4
1	1,5	1,6	2	0,5	0,4	33	25

Tabla 5.21: Lateral del transformador - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1300

Para este último valor de permeabilidad magnética relativa, los valores obtenidos a partir de CEDIMET exceden el máximo de las mediciones dejando de considerarse adecuado.

Por lo tanto, se considera apropiado elegir la iteración cuyo valor de permeabilidad magnética relativa para el acero de la cuba es de 1350.

Definido el modelo, se simulan el frente y el lateral de los transformadores de 2300 *kVA* y 2700 *kVA* mencionados anteriormente y los resultados se presentan en las tablas 5.22, 5.23 y 5.24, 5.25 respectivamente.

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μT)	Campo MIN(μT)	Campo (μT)	Desviación MAX (μT)	Desviación MIN (μT)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	71	58	73	2	15	3	27
1	29	14	9	20	5	67	32
2	6	4	2	4	2	59	39

Tabla 5.22: Frente del transformador 2300 *kVA* - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1350

Capítulo 5. Transformadores

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μ T)	Campo MIN(μ T)	Campo (μ T)	Desviación MAX (μ T)	Desviación MIN (μ T)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	90	88	72	18	16	20	18
1	10	14	9	1	5	12	37
2	6	4	2	4	2	62	42

Tabla 5.23: Lateral del transformador 2300 kVA - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1350

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μ T)	Campo MIN(μ T)	Campo (μ T)	Desviación MAX (μ T)	Desviación MIN (μ T)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	43	41	24	19	17	44	41
1	6	6	4	2	2	40	40
2	2	2	1	1	1	49	49

Tabla 5.24: Frente del transformador 2700 kVA - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1350

Distancia (m)	Medidas		CEDIMET		Comparación		
	Campo MAX (μ T)	Campo MIN(μ T)	Campo (μ T)	Desviación MAX (μ T)	Desviación MIN (μ T)	error relativo MAX(%)	error relativo MIN(%)
0	38	33	52	14	19	36	57
1	8	7	5	3	2	39	30
2	1,5	1,4	1,2	0,3	0,2	20	14

Tabla 5.25: Lateral del transformador 2700 kVA - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1350

De acuerdo a los resultados en la vista frontal de ambos transformadores, se puede observar que a 0 m se presenta una gran diferencia. Dado que sus partes activas son muy similares constructivamente, cabe suponer que dicha diferencia reside en la cuba, particularmente en las aletas, donde para el transformador de 2300 kVA tienen una profundidad de 210 mm mientras que para el de 2700 kVA de 320 mm. Esto sugiere una posible limitación para el cuarto modelo a estudiar en un trabajo futuro. Para los transformadores de baja tensión estandarizados según especificaciones de UTE, donde las aletas son menores a 210 mm debido a que son transformadores de menor potencia y por lo tanto necesitan de una menor disipación térmica, el cuarto modelo continua siendo adecuado. Para las medidas a 1 m los errores oscilan entre un 32% y 40% lo cual indica la necesidad de definir un factor de seguridad que ajuste la velocidad de caída en la simulación.

En cuanto al lateral de los transformadores no hay un comportamiento determinado, pero se resuelve utilizar un factor de seguridad distinto al del frente, con el fin de reducir el margen de riesgo ante el incumplimiento de la norma, ya que para la mayoría de los casos los valores simulados se encuentran por debajo de los medidos.

5.6. Factor de seguridad

Como se dijo anteriormente es de interés el aplicar un factor de seguridad diferente para el modelo del frente y lateral, con el fin de amparar los resultados bajo un criterio conservador. En la tabla 5.26 se pueden observar los errores máximos obtenidos para las simulaciones de los tres transformadores ensayados. Cabe destacar que para la misma solo se consideraron los errores a 0 m y 1 m, ya que para distancias superiores se teme estar dentro de la influencia de los dispositivos eléctricos necesarios para la realización de los ensayo de cortocircuito, los cuales no están considerados dentro del ruido habitual de la fábrica.

	Error máximo en Frente (%)	Error máximo en Lateral (%)
250 kVA	12,5	27
2300 kVA	67	37
2700 kVA	44	57

Tabla 5.26: Errores máximos de las simulaciones de los tres transformadores ensayados

Considerando que el transformador de 250 *kVA* es uno de los modelos estándar para las subestaciones de distribución de UTE en Baja Tensión, es el que más peso tiene en la elección del factor.

Se considera un segundo criterio conservador restringiendo la aplicación del modelo para transformadores cuyas aletas no superen los 210 *mm* de profundidad, y se elige un factor de seguridad de 1,25 para las simulaciones del frente, superando el máximo error presente en el 250 *kVA*, pero estando por debajo de la media entre los tres. Para el lateral, se aplican las mismas restricciones que en el frente y se elige un factor de 1,1, ya que en en la mayoría de los casos el valor simulado excede el máximo de los medidos.

5.7. Cotas

Para el valor de permeabilidad magnética de 1350 elegido para la cuba en la parte anterior, se vuelven a determinar los exponentes con los cuales cae el valor de la densidad de flujo magnético en función de la distancia. Para ello, se plantea la siguiente expresión, análoga a la planteada por Siemens en la Sección 5.2.2.

$$B(d) = B(1) \left(\frac{1}{d} \right)^x \quad (5.9)$$

Donde $B(1)$ es el valor de la densidad de flujo magnético a una distancia de 1 metro del transformador.

Como se mencionó anteriormente, para las medidas realizadas en la vista frontal del transformador, tomando $d = 2$, el exponente x de la ecuación 5.9 para los tres transformadores medidos varía entre 1,6 y 2,1. Para la vista lateral, la variación es entre 1,3 y 2,4.

Según los nuevos valores simulados, los exponentes varían entre 1,8 - 2,3 y 1,9 - 2 respectivamente.

Por lo tanto, se observa que los valores calculados tienden a caer más rápidamente que los medidos para la vista frontal, mientras que no hay un comportamiento determinado para la vista lateral.

En la mayoría de las instalaciones de Media Tensión, tanto existentes como proyectadas, se desconoce a priori el detalle constructivo del transformador. Por esta razón, no es posible modelarlo en FEMM de la forma que se explicó anteriormente, ya que para ello es necesario conocer dimensiones y distancias internas. Estos datos son confidenciales y no son proporcionados por la empresa fabricante.

Es por esta razón que se propone la realización de un ensayo para medir el valor de densidad de flujo magnético a una distancia determinada, por ejemplo un metro, de forma que luego se pueda extrapolar dicho dato a distancias mayores utilizando la ecuación 5.9.

Dada la variabilidad en los valores de los exponentes, tanto para los valores medidos como los simulados, se debe tomar un criterio para elegir cual utilizar.

Como se busca estimar los peores casos para evaluar si se encuentran dentro de los límites establecidos, el criterio elegido es el de utilizar el exponente que devuelva el valor de densidad de flujo magnético más alto.

De esta forma, de acuerdo con las medidas realizadas, se elige $x = 1,6$ para la vista frontal y $x = 1,3$ para la vista lateral.

Es importante destacar que el ensayo sugerido debe estar bien determinado y estandarizado, de forma de reducir al máximo cualquier otra fuente de campo y de uniformizar el método de medida.

Capítulo 5. Transformadores

Según un estudio [22] realizado por EPRI (Electric Power Research Institute) se encuentran niveles de campo magnético más altos en las cercanías de transformadores de potencias grandes que de potencias pequeñas. Además, los valores de campo adyacentes a la cuba del transformador son considerablemente mayores a los encontrados típicamente en una residencia. Al aumentar la distancia al transformador, los niveles de campo descienden bruscamente. Según este estudio, a distancias horizontales de entre 3 y 4,5 metros del transformador los valores de densidad de flujo magnético encontrados son menores a $0,3 \mu T$, número que está dentro del rango típico en una residencia.

En este estudio se analiza el perfil de densidad de flujo magnético según la distancia horizontal medida desde la pared de dos transformadores, uno de 750 kVA y otro de 50 kVA . Los resultados se muestran en las tablas 5.27.

(a) Transformador 750 kVA		(b) Transformador 50 kVA	
Distancia (m)	Densidad de flujo magnético (μT)	Distancia (m)	Densidad de flujo magnético (μT)
0	90	0	28
1	8	1	3,1
2	1,7	2	1,3

Tabla 5.27: Perfil de densidad de flujo magnético a lo largo de un eje horizontal - Medidas EPRI

Se observa que los valores obtenidos son del mismo orden que los medidos. En cuanto al exponente con el que caen, el mismo vale 2,2 y 1,3 respectivamente, números que pertenecen al rango determinado previamente.

5.8. Resumen

Del estudio de la bibliografía relacionada con campos magnéticos generados por transformadores, se puede concluir que no existe un consenso de la magnitud que este genera en sus cercanías y como hallar dicho valor. Por lo que se procede a analizar su comportamiento mediante un software, el cual es validado a través de mediciones.

Inicialmente se estudia el modelado de los transformadores utilizando PDETool, herramienta de Matlab que permite resolver ecuaciones en derivadas parciales. Se concluye que dicha herramienta no es apta para estudios de esta índole, dado que únicamente permite resolver problemas planares y la solución es escalar y no vectorial, imposibilitando el posterior cálculo del valor RMS de \vec{B} . Se procede a utilizar FEMM, software que brinda la posibilidad de modelar problemas con un eje de simetría axial. Dado que sus resultados son vectoriales y es compatible con Matlab, es posible realizar en este último una rutina que calcule la densidad de flujo magnético RMS.

Se plantean cuatro modelos basados en los detalles constructivos brindados por el fabricantes de los transformadores ensayados. El primero de ellos no considera la cuba y se descarta dado que los valores simulados son mucho mayores que los medidos. Esto es consistente con el hecho de que la cuba posee mejores propiedades magnéticas que el aire, ofreciendo un camino de menor reluctancia para las líneas de flujo de dispersión.

Seguidamente, al no ser posible realizar en FEMM un modelo exacto de la cuba, como primera aproximación se supone la misma con espesor uniforme e igual al del fondo, y con permeabilidad magnética relativa de 1500. Bajo esta hipótesis, el valor de densidad de flujo magnético desciende considerablemente logrando ser comparable con lo medido.

De todas formas, se plantea un tercer modelo que busca estudiar el impacto de la variación del espesor de la cuba, definiéndose el fondo, la tapa y los ángulos con sus respectivos espesores y considerando únicamente la zona de la aleta más próxima a la parte activa.

5.8. Resumen

Dado que este modelo no arroja resultados óptimos, se desarrolla un cuarto y último modelo, donde se le agrega al anterior un segundo apantallamiento, representando el efecto de las aletas. De la comparación de los resultado medidos y simulados en los tres transformadores, tanto en las vistas frontal y lateral, se elige el cuarto modelo ya que éste es el que presenta los menores errores globales.

De manera de obtener un modelo más exacto, se ajusta la permeabilidad magnética relativa del material de la cuba, a través de un método iterativo, llegando a un valor de 1350. Se decide aplicar un factor de seguridad diferente para las vistas frontal y lateral, con el fin de amparar los resultados bajo un criterio conservador. Los mismos valen 1,25 y 1,1 respectivamente.

En general no es posible acceder a los detalles constructivos del transformador, por lo que se plantea una cota para los valores de densidad de flujo magnético.

Finalmente, es importante destacar que se ensayaron transformadores de grandes potencias, de secundario de Baja Tensión, y se encontró que el campo generado por los mismos no supera los límites establecidos por la ICNIRP.

Es por esta razón que se propone el uso de factores de seguridad y cotas. Se espera que en un futuro los límites establecidos tiendan a bajar, como ya ocurre en otros países, Argentina por ejemplo, donde el máximo es $25 \mu T$. Por lo tanto, se debe tender a modelos cada vez más exactos, de forma de asegurar que lo simulado representa un peor caso de la realidad.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 6

Subestaciones

Las subestaciones son instalaciones que reducen el voltaje de Media Tensión a Baja Tensión, representando el último escalón de transformación de la red de Distribución. La importancia de conocer los niveles de densidad de flujo magnético que se presentan en las mismas, se relaciona con el gran número que hay distribuidas en las zonas urbanas y las altas corrientes que presentan. Existen en Uruguay dos tipos de subestaciones, aéreas o tipo caseta. En ambos casos, los elementos que las componen y emiten campo magnético son: transformadores, cables o líneas de la alimentación en MT, cables o líneas de las derivaciones en BT y tableros en ambos niveles de tensión. Por lo tanto, para el estudio de la densidad de flujo magnético presente en las instalaciones de una subestación se debe considerar el aporte de cada uno de ellos y su superposición.

En el Capítulo 4 se destacan los parámetros involucrados en el valor y la distribución de la densidad de flujo magnético generado por una línea trifásica de MT. En el mismo se vio la importancia de conocer la corriente por la línea y su variación instante a instante, ya que el valor y la distribución de \vec{B} acompañan dicha variación. Además, se estudiaron diferentes configuraciones para la disposición geométrica de las fases manteniendo la corriente constante, observándose importantes diferencias en los resultados. Esto permite destacar la fuerte correlación entre la geometría de los conductores y los valores de campo generados.

En el Capítulo 5 se estudió la densidad de flujo magnético en los alrededores de un transformador. Se observó la fuerte dependencia de la misma con el detalle constructivo del transformador, siendo necesario para modelar el mismo conocer las dimensiones del núcleo y bobinas, y la distancia interna de estos elementos a la cuba. Además, se detectó la influencia de las aletas y las propiedades magnéticas de la cuba en los valores de campo adyacentes al transformador. Se encontró una carencia en el software 2D utilizado en cuanto a la imposibilidad de obtener un resultado vectorial en las tres dimensiones, de forma de calcular el valor RMS según las componentes en los tres ejes. Si bien la simulación en dos dimensiones aproxima de forma aceptable los valores de campo de acuerdo con la literatura disponible, no permite evaluar las distintas caras del transformador en forma simultánea.

Por lo tanto, teniendo en cuenta estos aspectos, se concluye que, para poder llevar a cabo un estudio detallado de la densidad de flujo magnético en la subestación, se debe tener conocimiento de ciertas magnitudes y detalles constructivos fundamentales.

En primer lugar, es necesario conocer el valor pico de corriente que circula por todos los elementos para el intervalo de tiempo en el cual se realiza el estudio. La demanda de la instalación, en general, no es constante, y una variación de la misma repercute directamente en la corriente y, por lo tanto, en la densidad de flujo magnético. Esto ocurre tanto para la corriente por cada una de las salidas, como la corriente por el transformador, la cual varía según la curva de demanda de la subestación.

Asimismo, en aquellas subestaciones para las cuales se distribuye el neutro en BT, en caso de existir un desbalance de corriente entre las fases es importante también conocer la magnitud del mismo. Esto provoca la circulación de una corriente por el neutro que representa una nueva fuente de

Capítulo 6. Subestaciones

campo magnético y hará aumentar su valor. Este efecto se observa en el trabajo [23].

También es importante conocer el plano de la subestación, y la disposición geométrica de cada uno de los conductores que pertenecen tanto a las derivaciones como a los tableros.

Para modelar los transformadores, es necesario conocer sus detalles constructivos, los cuales son confidenciales y no son brindados por el fabricante. Las potencias típicas encontradas en este tipo de instalación son de 160, 250, 400 y 630 kVA , aunque puede haber transformadores de mayor potencia.

Luego, para poder simular la interacción de todas las fuentes de campo magnético se debe utilizar un programa 3D que permita obtener el campo resultante en cada eje del espacio y así hallar el valor RMS, dado que éste es el que limita la ICNIRP.

Se tuvo contacto con personas vinculadas al tema en Argentina que poseen un software y herramientas adecuadas para llevar a cabo simulaciones y mediciones en su país y realizaron un estudio [23] al respecto. En éste, se menciona que las subestaciones varían según cómo están montadas, existiendo diferentes tipos de tableros en MT y BT y formas de conectarlos con el transformador.

Los tableros de BT pueden ser convencionales o compactos, donde varían las distancias entre las barras que lo forman y entre sus derivaciones, siendo mayores las del primer tipo.

A su vez, las conexiones entre los tableros y el transformador puede ser por medio de cables enterrados, en bandejas, a nivel del suelo o barras, y puede realizarse desde distintos ángulos.

En [23] se realizan distintas simulaciones en una subestación cuyo plano se muestra en la figura 6.1.

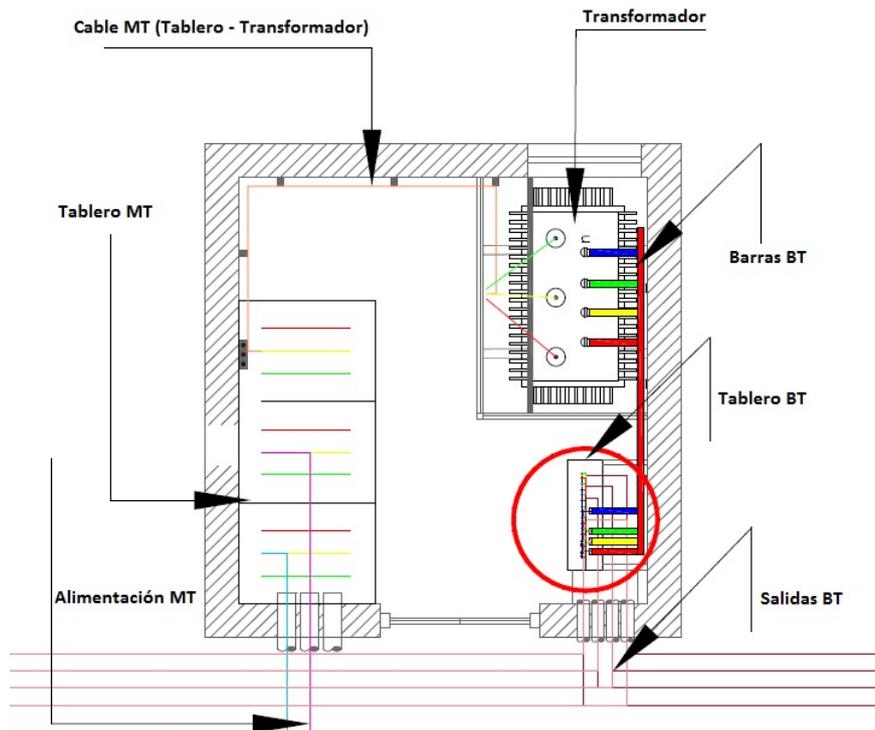


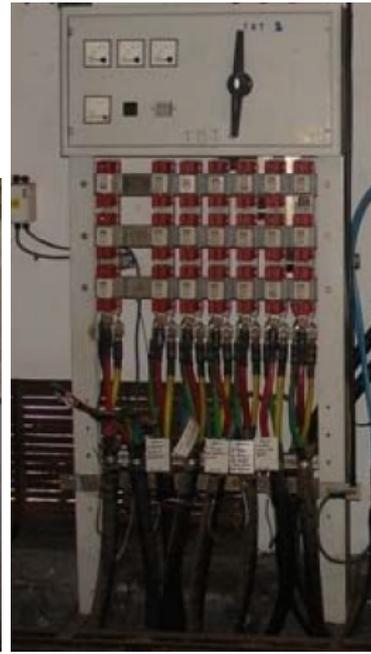
Figura 6.1: Plano de la subestación considerada

Se considera que el tablero de MT es un modelo típico disponible comercialmente, y para la conexión entre éste y el transformador se asume un cable trifásico de MT dispuesto a nivel del suelo.

Para el tablero de BT se simulan los dos tipos mencionados anteriormente y presentados en la figura 6.2. La conexión entre el tablero de BT y el transformador se hace con barras dispuestas en la pared de la subestación, las cuales llegan lateralmente al tablero convencional y por la parte superior al tablero compacto.



(a) Tablero BT convencional



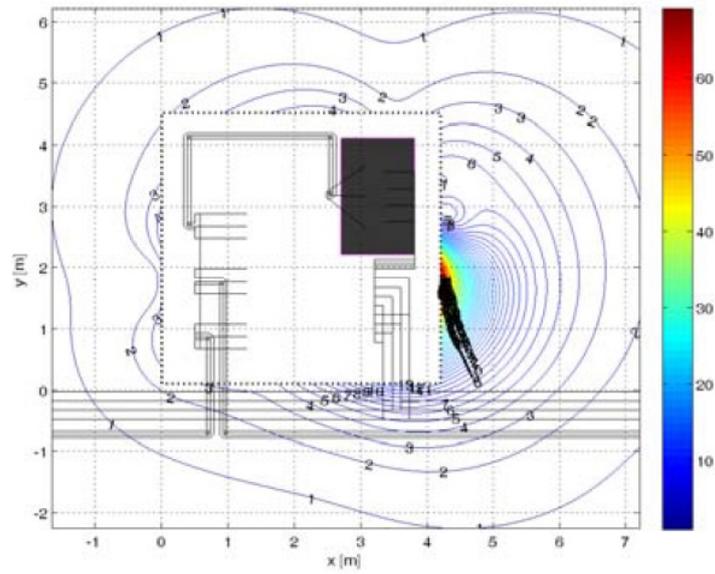
(b) Tablero BT compacto

Figura 6.2: Tableros BT

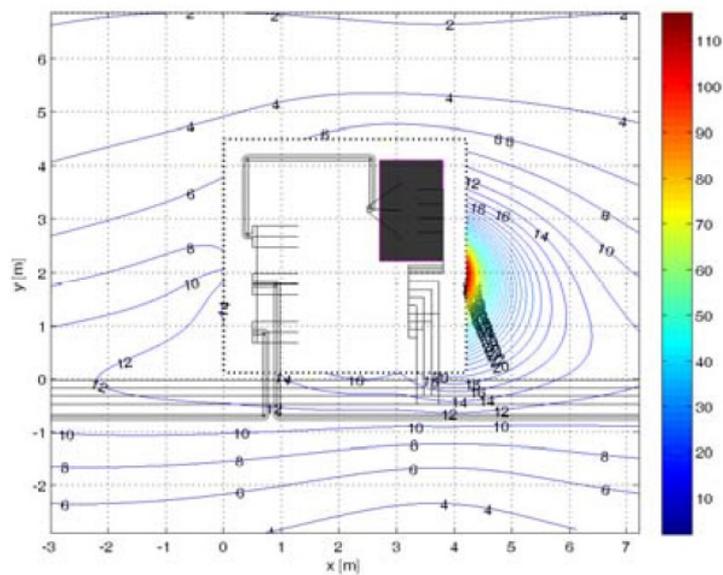
Tanto la alimentación en MT como las salidas en BT se realizan con cables subterráneos.

Para las simulaciones se consideran modelos tridimensionales, calculando el valor de la densidad de flujo magnético en los tres ejes, para luego hallar el campo total.

En la figura 6.3 se muestran los peores casos encontrados, que corresponden a un tablero de BT del tipo convencional. En el tablero compacto se presentan menores valores de campo, debido a que las distancias entre conductores son menores en el primero.



(a) Tablero BT convencional - Corrientes balanceadas



(b) Tablero BT compacto - Corrientes desbalanceadas

Figura 6.3: Densidad de flujo magnético simulada en la subestación 6.1

En la figura 6.3(a) las corrientes por las salidas son balanceadas (B), mientras que en la figura 6.3(b) existe corriente por el neutro (D). La magnitud y fase de las mismas se muestran en la tabla 6.1.

Corrientes (A)							
	I_{BT_R}	I_{BT_S}	I_{BT_T}	I_{BT_n}	I_{MT_R}	I_{MT_S}	I_{MT_T}
B	490 \angle -30°	490 \angle -150°	490 \angle 90°	0 \angle -0°	14,9 \angle 0°	14,9 \angle -120°	14,9 \angle 120°
D	500 \angle 0°	490 \angle -125°	555 \angle 120°	100 \angle 126°	14,6 \angle 27°	14,7 \angle -90°	15,2 \angle 148°

Tabla 6.1: Corrientes consideradas en las simulaciones de la figura 6.3

Se encuentra que los mayores valores de densidad de flujo magnético se presentan en los alrededores del tablero y barras de BT.

Si se consideran corrientes balanceadas, los valores simulados son menores que en el caso de existir corriente por el neutro, dado que como se mencionó anteriormente, éste se convierte en un conductor adicional que contribuye al campo total.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 7

Software desarrollado

Dado que el proyecto consiste en elaborar un software que permita modelar el campo magnético en una instalación de Media Tensión, se presenta a continuación una descripción del mismo, destacando sus principales rutinas. Imágenes de la interfaz gráfica desarrollada se encuentran en el Apéndice B.

7.1. Plataforma

Se consideró como un supuesto del proyecto que el software fuera implementado en Matlab, particularmente mediante el uso de Interfaces Gráficas de Usuario (GUI) brindadas por dicho programa. Una GUI ofrece una mejor experiencia para el usuario, ya que permite el ingreso de datos y la visualización de resultados de una forma amigable, sin necesidad de trabajar directamente con el código desarrollado en el lenguaje de programación correspondiente.

7.2. Arquitectura del software

El software se compone de diferentes GUI's, conectadas entre ellas, las cuales contienen las distintas rutinas desarrolladas. Éstas últimas, a su vez, llaman a funciones previamente definidas. Las transiciones entre las GUI's ocurren al seleccionar, a partir de una pregunta, la opción deseada, presionando un botón.

El programa simula la densidad de flujo magnético generada por líneas y transformadores, tratando a ambos elementos de forma independiente. Por lo tanto, para cada caso se solicitan al usuario los datos necesarios para realizar los cálculos. Esta información es leída y almacenada por todas las rutinas desarrolladas, las cuales la utilizan como parámetros de entrada para las funciones correspondientes. A continuación se detallan las principales funciones elaboradas para ambos casos.

7.2.1. Líneas

Para líneas, el programa permite elegir la configuración deseada:

- Simple terna sin hilo de guardia
- Simple terna con hilo de guardia
- Doble terna sin hilo de guardia
- Doble terna con hilo de guardia

A su vez, para cada configuración, el programa pregunta al usuario si el largo del vano es conocido. De esta forma, es posible elegir entre dos opciones: vano infinito o vano finito.

Para el primer caso, es necesario conocer la coordenadas de cada una de las fases, el valor RMS de corriente por la línea y, si corresponde, las coordenadas del hilo de guardia, su sección y la resistividad del suelo.

Para el segundo caso, es necesario conocer además, las longitudes del vano principal y sus vanos adyacentes, el desnivel del suelo y la tensión máxima y peso unitario de los conductores.

Simple terna - Sin hilo de guardia - Vano infinito

`campo_SimpleTerna(x,y,iA,iB,iC,xA,xB,xC,yA,yB,yC)` Esta función calcula, utilizando Biot-Savart, el valor RMS de la densidad de flujo magnético generada por la simple terna en el punto (x,y) de una grilla previamente definida. x_A e y_A corresponden a la abscisa y a la ordenada de la fase A respectivamente, mientras que i_A es la corriente que circula por la misma (análogo para las fases B y C).

Simple terna - Con hilo de guardia - Vano infinito

`guardia_SimpleTerna(l,xA,xB,xC,xG,yA,yB,yC,yG,rho,Sg)` Esta función calcula, utilizando el método de C. H. Gary, la corriente que circula por el hilo de guardia presente en la simple terna. Para ello, utiliza las coordenadas de las fases, el valor pico de corriente que circula por la terna, la resistividad del suelo y la sección del hilo de guardia.

`campo_SimpleTerna_Guardia(x,y,iA,iB,iC,iG,xA,xB,xC,xG,yA,yB,yC,yG)` Esta función calcula la densidad de flujo magnético generada por la simple terna de forma análoga a la primera función presentada, pero considerando también el aporte del hilo de guardia, ubicado en las coordenadas (xG,yG).

Simple terna - Sin hilo de guardia - Vano finito

`Catenaria(To,P,z,AB1,yA1,yB1,yC1)` Esta función calcula la altura de cada conductor correspondiente a cada fase, en la posición z, según la forma de catenaria que describen los mismos. Se utiliza cuando el nivel de suelo es constante. Es necesario ingresarle como parámetros de entrada la tensión máxima de los conductores (T_o), el peso unitario de los mismos (P), el largo total del vano (AB) y las ordenadas de las fases.

`campo_ST_CatenariaComun(To,q,AB1,AB2,AB3,i,1,j,l,xA,xB,xC,yA,yB,yC,t,n)` Esta función calcula el valor RMS de la densidad de flujo magnético a 1 metro de altura, para el punto (i,j) de los ejes (x,z). Para ello, considera tanto el aporte del vano principal (AB2) como el de los vanos adyacentes (AB1 y AB3). El parámetro t corresponde al vector de tiempos definido para un período y el parámetro n es el largo de dicho vector.

`CatenariaCorrida(To,P,z,AB1,yA1,yB1,yC1,(d2-d1))` Esta función es análoga a *Catenaria*, pero para el caso en que el nivel del suelo no es constante y puede modelarse como una rampa. El último parámetro a ingresar es la diferencia entre las alturas de las columnas que forman el vano.

`campo_ST_CatenariaCorrida(To,q,AB1,AB2,AB3,d1,d2,d3,i,1,j,l,xA,xB,xC,yA,yB,yC,t,n)` Esta función es análoga a *campo_ST_CatenariaComun*, pero considera el desnivel del suelo para el cálculo de la densidad de flujo magnético a un metro del mismo. Los parámetros d_1 , d_2 y d_3 corresponden a la altura de las bases de cada una de las columnas que forman los tres vanos, con respecto a la horizontal definida por la última columna, considerada en el punto más bajo del nivel del suelo.

Simple terna - Con hilo de guardia - Vano finito

$Catenaria_Guardia(To,P,z,AB1,yA1,yB1,yC1,yG)$ Esta función es análoga a *Catenaria*, pero calcula además la altura del hilo de guardia en la posición z .

$campo_ST_CatenariaComun_Guardia(To,q,AB1,AB2,AB3,i,1,j,l,IG,phi,xA,xB,xC,xG,yA,yB,yC,yG,t,n)$ Esta función es análoga a *campo_ST_CatenariaComun*, pero agrega además el aporte de la corriente por el hilo de guardia a la densidad de flujo magnético total. Para ello, es necesario ingresarle como parámetros la magnitud y fase de dicha corriente (IG,phi), obtenidas mediante la función *guardia_SimpleTerna*. También se deben ingresar las coordenadas (xG,yG) del hilo de guardia.

$CatenariaCorrida_Guardia(To,P,z,AB1,yA1,yB1,yC1,yG,(d2-d1))$ Esta función es análoga a *CatenariaCorrida*, pero calcula además la altura del hilo de guardia en la posición z .

$campo_ST_CatenariaCorrida_Guardia(To,q,AB1,AB2,AB3,d1,d2,d3,i,1,j,l,IG,phi,xA,xB,xC,xG,yA,yB,yC,yG,t,n)$ Esta función es análoga a *campo_ST_CatenariaCorrida*, pero agrega el aporte de la corriente por el hilo de guardia a la densidad de flujo magnético total.

Para doble terna, se desarrollaron una serie de funciones análogas, las cuales se listan a continuación:

$campo_DobleTerna$

$guardia_DobleTerna$

$campo_DobleTerna_Guardia$

$campo_DT_CatenariaComun$

$campo_DT_CatenariaCorrida$

$campo_DT_CatenariaComun_Guardia$

$campo_DT_CatenariaCorrida_Guardia$

7.2.2. Transformadores

Para transformadores, el programa pregunta si los valores de densidad de flujo magnético a un metro del transformador para sus vistas frontal y lateral son conocidos.

De ser así, tras ingresarlos, se calcula cómo varían estos valores con la distancia a la pared de la cuba. Para ello, se utiliza la fórmula de cotas del Capítulo 5, Sección 5.7.

En caso contrario, se presentan una serie de transformadores típicos de la red de Distribución, simulados según los detalles constructivos brindados por un fabricante de transformadores y con los factores de seguridad determinados en el Capítulo 5, Sección 5.6.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 8

Conclusiones

Ante la aprobación del Decreto 001 – 2714/2013 en Uruguay, surge el proyecto CEDIMET, el cual tiene como objetivo crear un software que permita modelar el campo magnético en una instalación de Media Tensión. Se supuso óptimo el abordaje del desafío mediante la división del problema principal en dos sub-problemas de menor complejidad, líneas y transformadores, para finalmente superponer sus efectos espacialmente y alcanzar la meta propuesta.

Se consideró como hipótesis fundamental el trabajar a frecuencia industrial, dónde el desacople de los campos eléctrico y magnético es posible, y debido a la importancia de sus efectos se desarrolló este último.

En cuanto a líneas, se simuló una línea trifásica de Media Tensión y bajo el mismo algoritmo de simplificación del problema, se inició con un modelo básico, se lo fue complejizando y mediante publicaciones, un software comercial y medidas realizadas, se lo validó obteniéndose resultados apropiados según la literatura considerada. En este proceso se advierte la necesidad de conocer la disposición geométrica de las fases, la forma que describen los conductores, el nivel del suelo y el valor pico de la corriente para el intervalo de tiempo en el cual se realiza la medición, a los efectos de una mejor predicción por parte del software de los valores de densidad del flujo magnético producidos por la línea.

Para los transformadores, utilizando la misma metodología de trabajo, se desarrolló un modelo a partir de mediciones y detalles constructivos, el cual permite simular las vistas lateral y frontal. Debido a las limitaciones de las herramientas disponibles, los resultados se calculan en dos dimensiones. Para el modelo, es necesario conocer datos constructivos, tales como las dimensiones de las bobinas y sus distancias al núcleo, a la cuba y entre ellas, las dimensiones del núcleo y su curva de magnetización, las dimensiones de la cuba y el espesor y la profundidad de sus aletas. Además, para el cálculo de la densidad de flujo magnético, es necesario conocer la corriente por el conductor de cada bobina y el número de vueltas de las mismas. En caso de no disponer de esta información, se propuso el uso de una cota, la cual se determina a partir de una medida puntual. Cabe acotar, que esta propuesta es novedosa, y por ello no se dispone de una normativa internacional que especifique principio, método y procedimiento de medición.

Finalmente, se buscó superponer los campos generados por ambos elementos, con motivo de simular la densidad de flujo magnético en una subestación, para lo cual se detectaron ciertos impedimentos. Uno de ellos fue la carencia del software 2D de transformadores, en cuanto a la imposibilidad de obtener un resultado vectorial en las tres dimensiones. Esto imposibilita superponerlo a los campos generados por los conductores que integran los terminales del transformador y los tableros de la instalación. A su vez, tampoco se dispone del nivel de detalle requerido por el algoritmo de líneas, tanto para la geometría como para el valor pico de corriente.

8.1. Trabajo a futuro

Dada la tendencia mundial de creciente preocupación por el impacto ambiental de las instalaciones eléctricas, se espera que, con el tiempo, los límites establecidos para la exposición a CEM de baja frecuencia disminuyan. Esto implica la necesidad de tener un software que acompañe dicha disminución, aumentando en veracidad. Por lo tanto, serán necesarios modelos cada vez más complejos y herramientas computacionales cada vez más exactas.

Como se concluyó en el Capítulo 6 es necesario utilizar un software en tres dimensiones, de forma de simular vectorialmente la superposición de la densidad de flujo magnético generada por cada elemento de la instalación que transporta corriente.

En el caso de las líneas aéreas se sugiere realizar una nueva campaña de mediciones, en más de un tramo. Para ello, se debe recabar para un largo período de tiempo la corriente por la línea y los valores de campo generados por la misma. Se sugiere contar con un instrumento preciso para medir el desnivel del suelo del lugar, así como con los detalles geométricos de la línea y los parámetros mecánicos de los conductores. Además, para el software de líneas desarrollado, se recomienda realizar un estudio profundo de un eventual mal condicionamiento numérico.

Para el transformador, se sugiere ahondar dentro de las limitaciones del modelo propuesto, para aquellos que pertenecen a la red de Distribución, estandarizados en sus especificaciones de compra por UTE. Se recomienda profundizar en el análisis del impacto de la forma de las aletas en la densidad de flujo magnético alrededor del transformador. Además, sería pertinente realizar un ensayo con el objeto de obtener el valor real de la permeabilidad magnética relativa de la cuba. Por último, para el uso de cotas en aquellos casos que se desconocen sus detalles constructivos, es necesario idear y normalizar un ensayo a realizar. Para ello, es necesario definir las características del instrumento de medida a utilizar, como por ejemplo que mida únicamente en el rango de frecuencias de interés (frecuencia industrial) y en los tres ejes. Además, se debe tener en cuenta la presencia de la densidad de flujo magnético generada por la barra que cortocircuita los bornes de baja tensión del transformador, buscando minimizar su influencia en la medida a realizar. También se sugiere limitar el ensayo a los transformadores cuya potencia sea la estandarizada por UTE en sus especificaciones de compra. Por último, se debe minimizar la influencia de todo campo externo al generado por el transformador.

Tanto para la validación del modelo de líneas como para la construcción del modelo de transformadores, se utilizó como instrumento de medida el *SPECTRAN NF-5030*, el cual consiste en un analizador de espectro de compatibilidad/interferencia electromagnética con sensores para medición de campo eléctrico y magnético. Dado que por limitaciones en las herramientas disponibles no fue posible calibrar el instrumento antes de su uso, se recomienda como posible trabajo futuro el montaje de una bobina de Helmholtz en el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad, para realizar este tipo de tareas.

Como se menciona en los objetivos del proyecto, los resultados encontrados pretenden ser un insumo para la elaboración de una guía futura, donde se busque mitigar el campo en las zonas críticas. Actualmente no se consideran estos aspectos previo al diseño de una instalación, por lo que sería positivo para el país, dada la tendencia mundial de mayores exigencias, contar con una guía en este sentido.

Apéndice A

ICNIRP - Conclusiones de la literatura actual [3]

A.1. Neurocomportamiento

La exposición a campos eléctricos de baja frecuencia causa respuestas biológicas bien definidas, desde percepción a molestia, debido a los efectos de la corriente superficial inducida. Para el 10 % más sensible de los voluntarios a 50-60 Hz, los umbrales para la percepción directa variaron entre 2 y 5 kV/m, y el 5 % encontró 15-20 kV/m molesto. La descarga de chispa de una persona a tierra es dolorosa para el 7 % de los voluntarios en un campo de 5 kV/m, mientras que es dolorosa para el 50 % en un campo de 10 kV/m. Los umbrales para la descarga de chispa desde un objeto cargado a través de una persona a tierra dependen del tamaño del objeto, por lo que requieren de valoración individual.

La capacidad de respuesta de los nervios eléctricamente excitables y el tejido muscular a los estímulos eléctricos, incluyendo los inducidos por la exposición a los CEM de baja frecuencia, ha estado bien definida desde hace muchos años. Se ha estimado que las fibras nerviosas mielinizadas del sistema nervioso periférico humano tienen un valor umbral mínimo de alrededor de $6 V_{pico}/m$, según cálculos teóricos realizados sobre un modelo del nervio. Sin embargo, la estimulación del nervio periférico inducida durante la exposición de voluntarios a los campos magnéticos de los sistemas de resonancia magnética (MR), sugirió que el umbral de percepción podía ser tan bajo como 2 V/m, basado en cálculos utilizando un modelo humano homogéneo. Un cálculo más preciso del campo eléctrico inducido en los tejidos de un modelo humano heterogéneo, basado en la información del estudio de MR, fue realizado por So et al. ¹. Estos autores estimaron el mínimo umbral para la estimulación del nervio periférico entre 4 y 6 V/m, basado en el supuesto que la simulación se realizó en la piel o en la grasa subcutánea.

Con estímulos mayores, el malestar y el dolor sobrevienen. El percentil más bajo para la estimulación intolerable está aproximadamente 20 % por encima del umbral medio de percepción. Las fibras nerviosas mielinizadas del sistema nervioso central pueden ser estimuladas por campos eléctricos inducidos durante una simulación magnética transcraneal (TMS); los campos pulsados inducidos en el tejido cortical durante una TMS son bastante altos ($> 100 (V_{pico}/m)$), aunque los cálculos teóricos sugieren que los valores de umbral de estimulación mínimos pueden ser tan bajos como $10 V_{pico}/m$.

Las células musculares son en general menos sensibles al estímulo directo que el tejido nervioso. El tejido muscular cardíaco merece particular atención, dado que un funcionamiento anormal pone en peligro la vida. Sin embargo, los umbrales de fibrilación ventricular exceden aquellos de estimulación del músculo cardíaco por un factor de 50 o más, aunque este número baja considerablemente si el corazón es excitado repetidamente durante el período vulnerable del ciclo cardíaco.

El efecto definido con mayor robustez para la excitación directa del nervio o el músculo por debajo

¹So PPM, Stuchly MA, Nyenhuis JA. Peripheral nerve stimulation by gradient switching fields in magnetic resonance imaging. IEEE Trans on Biomed Eng 51:1907–1914; 2004.

de los umbrales, es la inducción de fosfenos en las retinas de los voluntarios expuestos a campos magnéticos de baja frecuencia. El umbral mínimo de flujo de densidad magnética es alrededor de 5 mT a 20 Hz , aumentando a mayores y menores frecuencias. En estos estudios, se cree que los fosfenos resultan de la interacción del campo eléctrico inducido con las células eléctricamente excitables de la retina. El umbral para la intensidad de campo eléctrico inducido en la retina ha sido estimado entre 50 y 100 mV/m a 20 Hz , aumentando a frecuencias mayores y menores, aunque existe una considerable incertidumbre asociada a estos valores.

Dos grupos de investigación han estudiado los efectos en el funcionamiento y la actividad eléctrica del cerebro humano, producidos por campos eléctricos débiles aplicados directamente en la cabeza por medio de electrodos. Uno de los grupos encontró que la estimulación de la corteza visual induce la percepción de fosfenos corticales únicamente para frecuencias cercanas a 10 Hz (condiciones de oscuridad) y a 20 Hz (condiciones de luz). El otro grupo aplicó una señal de 20 Hz a la corteza motora de los voluntarios durante la realización de una tarea motora-visual, encontrando una pequeña pero estadísticamente significativa ralentización del movimiento de la mano. Por lo tanto, ambos grupos encontraron que los campos eléctricos de $10 - 20 \text{ Hz}$ por encima del umbral de los fosfenos en la retina, pueden interactuar con la actividad eléctrica rítmica en curso en las cortezas visuales y motoras; y afectar ligeramente el procesamiento visual y la coordinación motora.

Sin embargo, para otros efectos neuroconductuales en la actividad eléctrica del cerebro, cognición, sueño y estado anímico de los voluntarios expuestos a CEM de baja frecuencia, la evidencia es mucho menos clara.

Por lo tanto, la percepción de carga eléctrica superficial, la estimulación directa del tejido nervioso y muscular y la inducción de fosfenos en la retina son los efectos bien establecidos. Además, existe evidencia científica indirecta de que las funciones cerebrales como el procesamiento visual y la coordinación motora pueden ser afectadas transitoriamente por los campos eléctricos inducidos.

A.2. Sistema neuroendocrino

Los resultados tanto de estudios voluntarios como de estudios epidemiológicos residenciales y ocupacionales, sugieren que el sistema neuroendocrino no es afectado adversamente por la exposición a campos eléctricos o magnéticos de $50-60 \text{ Hz}$. Esto aplica particularmente a niveles de circulación de hormonas específicas, incluyendo la melatonina liberada por la glándula pineal, y a un número de hormonas involucradas en el control del metabolismo del cuerpo y liberadas fisiológicamente por la glándula pituitaria. La mayoría de los estudios de laboratorio sobre los efectos de la exposición a $50-60 \text{ Hz}$ en los niveles de melatonina de la noche en voluntarios, no reportaron efectos cuando se tomaban cuidados para controlar posibles factores de confusión.

Del gran número de estudios realizados sobre animales, investigando el efecto de campos eléctricos y magnéticos de $50-60 \text{ Hz}$ sobre los niveles de melatonina pineal y en suero en ratas, algunos reportaron que la exposición resultó en la supresión de melatonina en la noche, mientras que otros estudios no lo hicieron. No se han encontrado efectos convincentes en los niveles de melatonina en estudios realizados sobre primates no humanos expuestos crónicamente a campos de $50-60 \text{ Hz}$.

Tampoco se han visto efectos consistentes en las hormonas relacionadas con el estrés del eje hipotalámico-hipofisario-adrenal en una variedad de especies mamíferas, con la excepción del estrés de corta duración, posterior a la exposición a un campo eléctrico de baja frecuencia de niveles suficiente altos como para ser percibido. De forma similar, no se han encontrado efectos negativos sobre los niveles de la hormona de crecimiento, ni de hormonas involucradas en el control de la actividad metabólica o asociadas al control de la reproducción y el desarrollo sexual.

Por lo tanto, los resultados obtenidos no indican que los campos eléctricos y/o magnéticos de baja frecuencia afecten el sistema neuroendocrino de una forma que pueda tener un efecto adverso sobre la salud de las personas.

A.3. Trastornos neurodegenerativos

Se ha planteado la hipótesis de que la exposición a campos de baja frecuencia está asociada a varias enfermedades neurodegenerativas.

Para el Parkinson y la esclerosis múltiple, el número de estudios realizados es pequeño y no hay evidencia para asociar dichas enfermedades con la exposición a campos de baja frecuencia.

Para el Alzheimer y la esclerosis lateral amiotrófica (ELA), existe un mayor número de estudios publicados. Algunos sugieren que las personas empleadas en trabajos eléctricos podrían tener mayor riesgo de contraer ELA. Hasta el momento no se ha establecido ningún mecanismo biológico que pueda explicar esta asociación, aunque podría haber surgido por factores de confusión relacionados con trabajos eléctricos, como descargas eléctricas. Estudios que utilizaron métodos más sofisticados de evaluación de la exposición no han observado en general mayores riesgos.

Para la enfermedad de Alzheimer, los resultados son inconsistentes. Las asociaciones más fuertes se han encontrado en estudios clínicos con gran potencial de sesgo de selección, pero el aumento de riesgo también ha sido observado en algunos estudios poblacionales. Los análisis de subgrupos dentro de los estudios refuerzan la impresión de datos inconsistentes. A pesar de haberse intentado la puesta en común de los resultados disponibles, la heterogeneidad estadística entre los resultados de los estudios lo ha imposibilitado. Además, existe evidencia de sesgo de publicación. Hasta el momento, solo existe un estudio residencial disponible, basado en un número muy pequeño de casos, el cual indica un aumento del riesgo de Alzheimer luego de una exposición a largo plazo. En general, la evidencia para la asociación entre la exposición a campos de baja frecuencia y las enfermedades de Alzheimer y ELA es poco concluyente.

A.4. Trastornos cardiovasculares

Estudios experimentales de exposición tanto a corto como largo plazo indican que, mientras una descarga eléctrica es peligrosa para la salud, otros efectos cardiovasculares peligrosos asociados con campos de baja frecuencia son poco probables de ocurrir a los niveles de exposición comúnmente encontrados en el medio ocupacional o ambiente.

A pesar de que varios cambios cardiovasculares han sido reportados en la literatura, la mayoría de los efectos son pequeños y los resultados no han sido consistentes dentro o entre estudios. La mayoría de los estudios acerca de la morbilidad y la mortalidad por enfermedades cardiovasculares no han mostrado asociación con la exposición, por lo que la existencia de una asociación específica entre la exposición y la alteración del control autónomo del corazón sigue siendo especulativa.

En general, la evidencia no sugiere una asociación entre la exposición a baja frecuencia y enfermedades cardiovasculares.

A.5. Reproducción y desarrollo

En general, estudios epidemiológicos no han mostrado una asociación entre resultados reproductivos adversos y la exposición materna o paterna a campos de baja frecuencia.

Existe evidencia limitada de aumento en el riesgo de aborto asociado a la exposición materna a campos magnéticos, pero dicha asociación no se ha encontrado en otros estudios y en general la evidencia que la respalda es pobre.

Se ha evaluado en distintos mamíferos la exposición a campos eléctricos de baja frecuencia de hasta 150 kV/m, incluyendo estudios en grupos de gran tamaño y con varias generaciones bajo exposición, sin encontrarse efectos adversos en el desarrollo. Mamíferos expuestos a campos magnéticos de baja

frecuencia no presentaron malformaciones externas, viscerales o esqueléticas con campos de hasta 20 mT .

En general, es muy débil la evidencia para asociar la exposición a campos de baja frecuencia con efectos sobre el desarrollo y la reproducción.

A.6. Cáncer

Un número considerable de reportes epidemiológicos, realizados particularmente durante las décadas de 1980 y 1990, indicaban que la exposición a largo plazo a campos magnéticos de 50-60 Hz, de órdenes de magnitud por debajo de los límites establecidos por la norma de exposición de la ICNIRP en el año 1998, podría estar asociada con cáncer. Mientras que los primeros estudios buscaban la relación entre los campos magnéticos y el cáncer infantil, la investigación luego se extendió al cáncer en los adultos.

En general, las asociaciones inicialmente observadas entre los campos magnéticos de 50-60 Hz y distintos cánceres, no fueron confirmadas en estudios especialmente diseñados para replicarlas. Sin embargo, para la leucemia infantil la situación es diferente. La investigación que siguió al primer estudio ha sugerido que podría haber una débil asociación entre niveles altos de exposición a campos magnéticos residenciales de 50-60 Hz y riesgo de leucemia infantil. No es claro si la misma es causal; una combinación de sesgo de selección, cierto grado de confusión y el azar, podrían explicar los resultados obtenidos.

Análisis combinados indican que puede existir un exceso de riesgo para exposiciones medias excediendo los 0.3-0.4 μT , aunque los autores de dichos análisis advirtieron fuertemente que sus resultados no pueden ser interpretados como demostración de una relación causal entre los campos magnéticos y la leucemia infantil.

Al mismo tiempo, los resultados experimentales de los estudios de laboratorio sobre células y animales no apoyan la noción de que la exposición a campos magnéticos de 50-60 Hz cause leucemia infantil.

La mayoría de los estudios no reportan leucemia o linfoma como efecto de los campos magnéticos en modelos de roedores. Varios estudios de gran escala y largo plazo aplicados a roedores no han mostrado un aumento consistente en ningún tipo de cáncer, incluyendo tumores en las mamas, en el cerebro y en la piel.

En general, estudios acerca de los efectos de la exposición de las células a campos de baja frecuencia no han mostrado inducción de genotoxicidad para campos por debajo de los 50 mT .

En contraste con la evidencia epidemiológica acerca de la asociación entre leucemia infantil y la exposición prolongada a campos magnéticos de frecuencia industrial, los datos sobre el cáncer en los animales son casi universalmente negativos.

Apéndice B

Interfaz gráfica



Figura B.1: Pantalla inicial

Inicialmente se da la bienvenida al programa y, luego de oprimir el botón de *Iniciar* (figura B.1), se despliega la opción de elegir entre transformadores y líneas, como se puede observar en la figura B.2.



Figura B.2: Líneas y Transformadores

B.1. Líneas

Tras haber elegido la opción *Líneas*, aparece una nueva pantalla con dos nuevas alternativas, simple terna y doble terna, como se puede observar en la figura B.3.

Apéndice B. Interfaz gráfica



Figura B.3: Simple terna y Doble terna

B.1.1. Simple Terna

En el caso de simple terna, se debe escoger entre una configuración con o sin hilo de guardia, como se muestra en la figura B.4.



Figura B.4: Simple terna y Doble terna

En estos casos, se pregunta a través de una ventana emergente (figura B.5), si la longitud del vano es conocida.



Figura B.5: Ventana emergente de longitud de vano

A partir de estas dos configuraciones, se despliegan las pantallas correspondientes, en las que se requiere introducir los datos necesarios del caso para el cálculo de la densidad de flujo magnético. En las figuras B.6 y B.7 se muestran los resultados de configuraciones sin hilo de guardia, conociendo el largo del vano y desconociendo el mismo respectivamente. En la figura B.8 se presentan los resultados de una configuración con hilo de guardia, de la cual se desconoce la longitud del vano.

B.1. Líneas

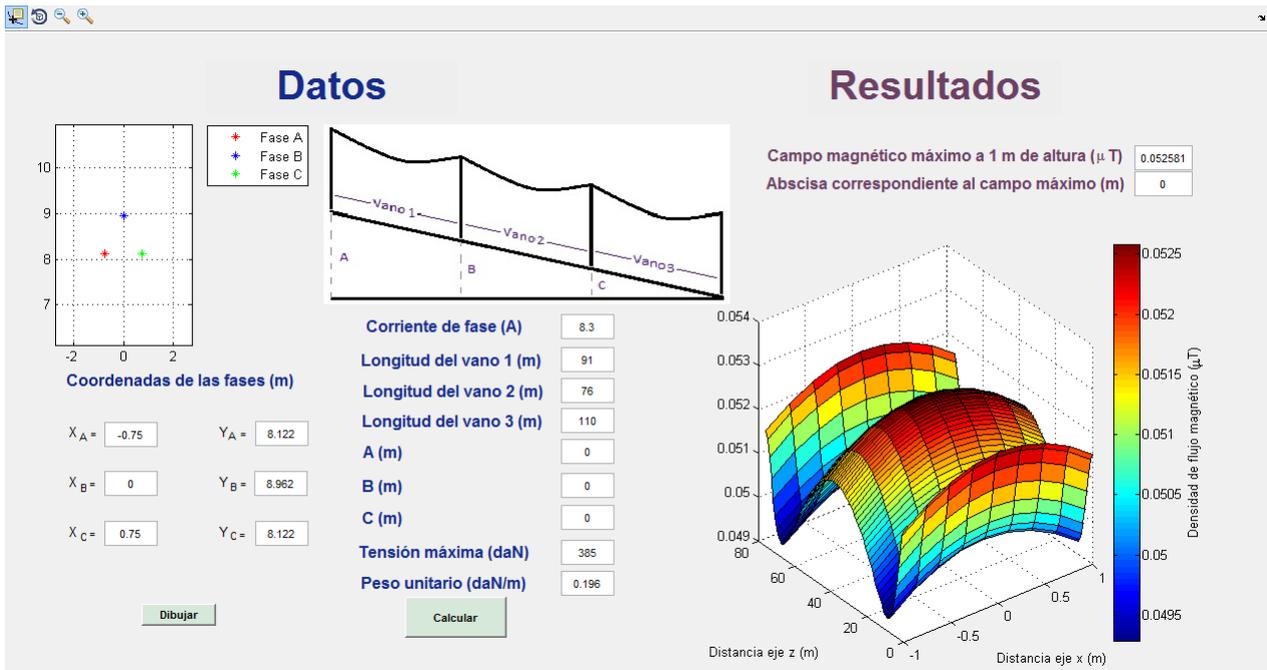


Figura B.6: Simple terna sin hilo de guardia conociendo el largo del vano

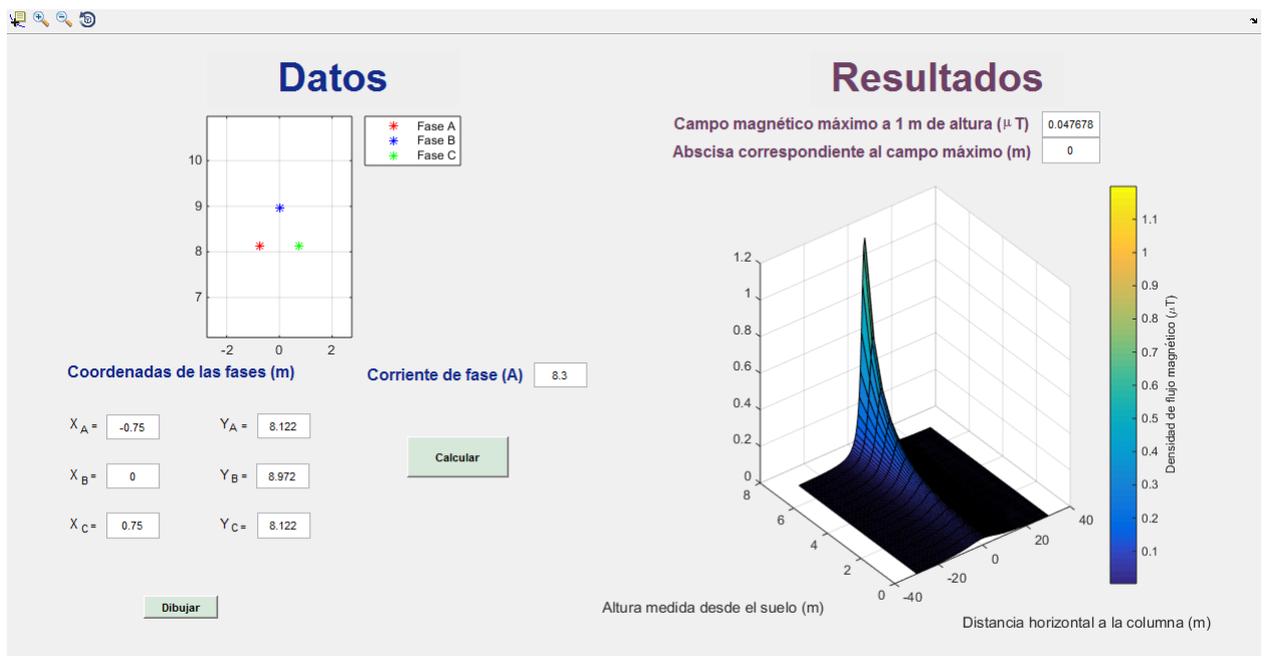


Figura B.7: Simple terna sin hilo de guardia

Apéndice B. Interfaz gráfica

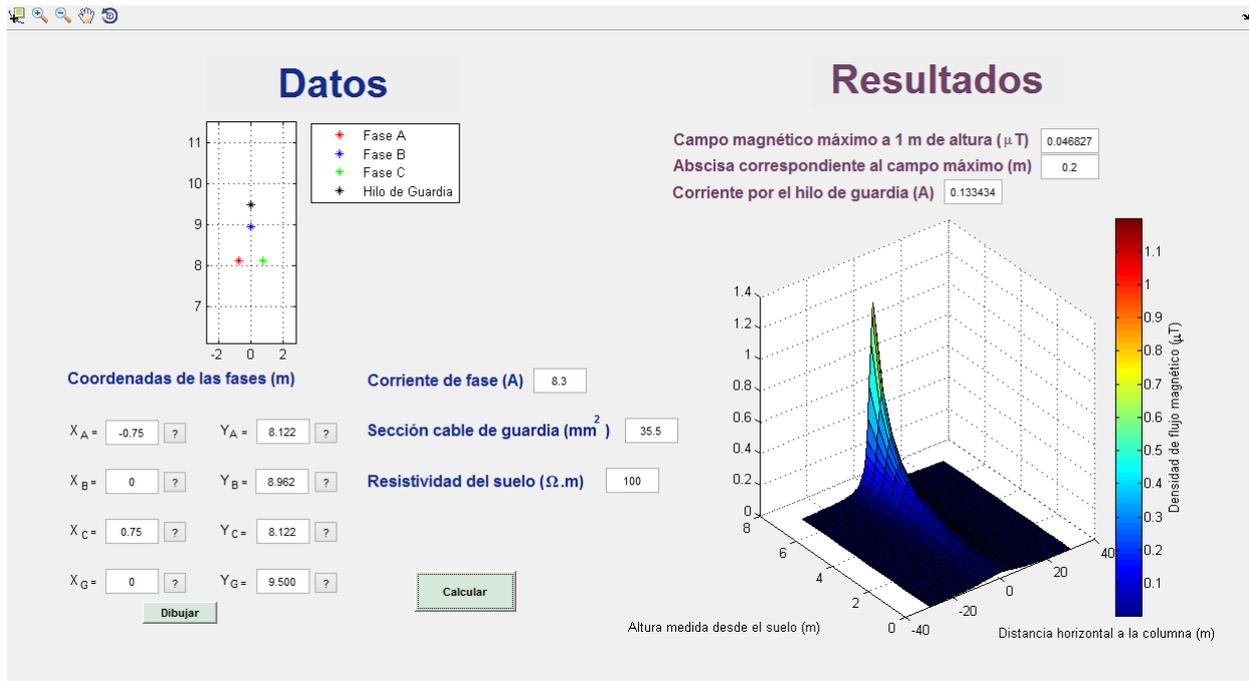


Figura B.8: Simple terna con hilo de guardia

En los tres casos, es la opción *Dibujar* la cual dibuja en la gráfica superior izquierda la posición de las tres fases y el hilo de guardia en caso de tenerlo. Del mismo modo, el botón *Calcular* es el responsable de desplegar el gráfico tridimensional del módulo de la densidad de flujo magnético y completar los campos correspondientes a los resultados.

Además, en la esquina superior izquierda se dispone de un menú con las siguientes opciones:



Figura B.9: Menú de opciones

las cuales tienen las siguientes funciones respectivamente:

- Despliega los valores de los datos del punto seleccionado en el gráfico
- Amplía el gráfico
- Aleja el gráfico
- Permite desplazarse dentro del gráfico
- Permite rotar el gráfico

B.1.2. Doble Terna

El programa funciona de forma análoga para Simple y Doble terna.

B.2. Transformadores

En caso de que se haya elegido la opción transformadores, emerge una ventana preguntando si el valor de la densidad de flujo magnético a 1 m del transformador es conocido, como se muestra en la figura B.10.

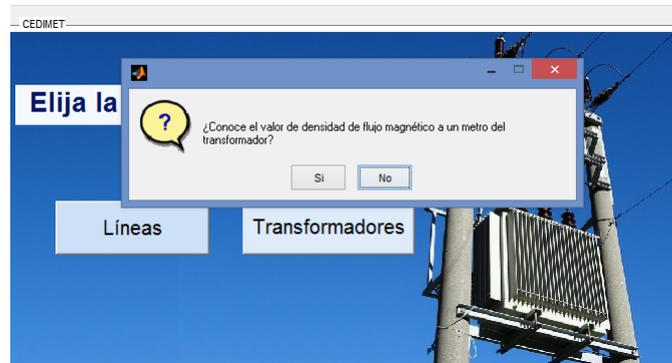


Figura B.10: Ventana emergente densidad de flujo magnético a 1 m del transformador

En caso afirmativo, se despliega la pantalla de la figura B.11, solicitando dicho valor para las vistas frontal y lateral del transformador. El botón Calcular realiza el gráfico de la variación del mismo con la distancia a la pared de la cuba.

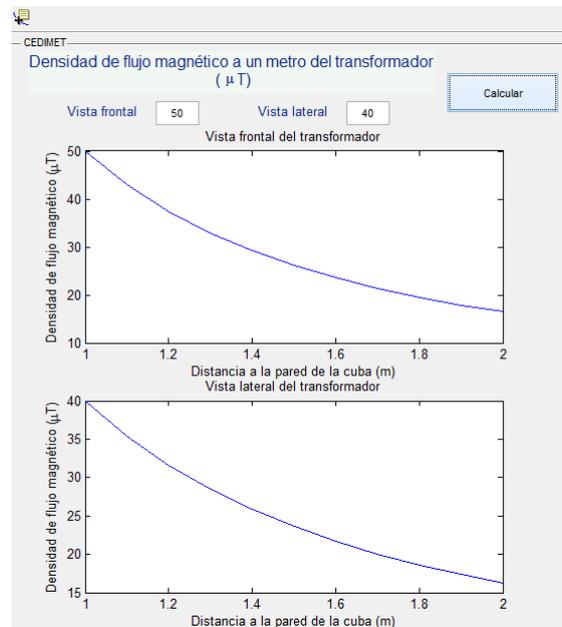


Figura B.11: Calculo de cotas

En caso contrario, se presenta una serie de transformadores típicos de las instalaciones de distribución en Baja Tensión de la Red Eléctrica Uruguaya, como se muestra en la figura B.12.

Apéndice B. Interfaz gráfica



Figura B.12: Elegir transformador

Seleccionando cada uno de ellos, se muestra la densidad de flujo magnético tanto en el lateral como en el frente del mismo. Por ejemplo, en la figura B.13 se expone el resultado de seleccionar el tercer transformador de la lista, correspondiente a un 250kVA $15/0,4 - 0,23\text{ kV}$.

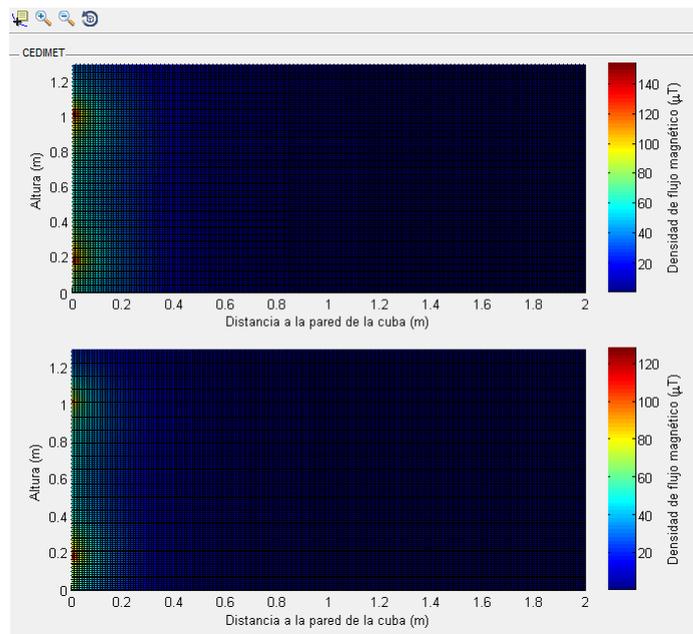


Figura B.13: Transformador 250kVA $15/0,4 - 0,23\text{ kV}$

Referencias

- [1] *Decreto* 001 – 2714/2013. Montevideo, Uruguay, 28 de febrero de 2014.
- [2] Organización Mundial de la Salud, *Proyecto Internacional CEM*. [On line][Consulta: 22 septiembre 2015] Disponible en: <http://www.who.int/peh-emf/project/es/>.
- [3] International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection, *ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz - 100 kHz)*. [On line][Consulta: 25 agosto 2015] Disponible en: <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdl.pdf>.
- [4] Curso Transporte de Energía Eléctrica, *Cálculo de constantes*. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Edición 2014.
- [5] J. Terzano, *Apuntes sobre diseño mecánico de líneas aéreas de distribución eléctrica*. Oficina de Normalización de Distribución de UTE. Fray Bentos. Julio 2011.
- [6] Reitz, Milford, and Christy, *Fundamentos de la teoría electromagnética*. México: Addison-Wesley Iberoamericana. Cuarta Edición.
- [7] Información brindada por el Ing. Carlos A. Wall. IITREE-LAT-FI-UNLP. La Plata, Argentina.
- [8] K. Friedl and E. Schmutzner, *Impact of the phase positions on the electric and magnetic field of high-voltage overhead lines*. En: CIRED, 20th International Conference on Electricity Distribution.
- [9] Safe Engineering Services technologies, *Electromagnetic Fields under a Transmission Line and Induced Currents on a Fence*. Versión 14. Enero 2012.
- [10] ABB, *Transformer Handbook*. [On line][Consulta: 7 julio 2016] Disponible en: http://new.abb.com/docs/librariesprovider27/default-document-library/abb_transformer_handbk.pdf?sfvrsn=2. Versión 2004.
- [11] E. F. B. Hofmann, *Distribution Transformers and EMC*. [On line][Consulta: 7 julio 2016] Disponible en: <http://www.energy.siemens.com/mx/pool/hq/power-transmission/Transformers/Distribution> Versión 2009.
- [12] Asociación Española de Normalización y Certificación, *Evaluación de los campos electromagnéticos alrededor de los transformadores de potencia: UNE-CLC/TR 50453 IN*. 2008. Madrid, 2008. 15p.
- [13] A. Azziz and A. Portillo, *Cálculo de fuerzas de cortocircuito en transformadores*.
- [14] S. Alvarado, *Cálculo de campos magnéticos y reactancias en transformadores por el método de elementos finitos*. Caracas: Universidad Simón Bolívar, 2012.
- [15] J. R. Arribas, *Cálculo de Pérdidas en la Carga de un Transformador por el Método de los Elementos Finitos*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2011.

Referencias

- [16] UTE, *Líneas aéreas de electrificación rural manual constructivo*. [On line][Consulta: 11 mayo 2016] Disponible en: http://www.ute.com.uy/Empresa/lineas/distribucion/normalizacion/docs/Manual_ER.pdf.
- [17] J. F. Mora, *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGRAW-HILL, 2003.
- [18] International Electrotechnical Commission, *Publications*. [On line][Consulta: 22 julio 2016] Disponible en: <http://www.iec.ch/standardsdev/publications/>.
- [19] Matlab, *Partial Differential Equation Toolbox User's Guide*. Massachusetts: The MathWorks, 1996.
- [20] D. Meeker, *Finite Element Method Magnetics User's Manual*. [On line][Consulta: 17 junio 2016] Disponible en: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>. 2015. Versión 4.2.
- [21] M. E. MATA-ZAMORA, B. VALERA-OROZCO, and H. MONTIEL, *Determinación de la permeabilidad inicial en ferritas suaves con el método modificado del anillo de Rowland*. *Superf. vacío*. [online]. 2012, vol.25, n.2, pp.122-127. ISSN 1665-3521.
- [22] Electric Power Research Institute, *Magnetic Fields Near Transformers*. California. Diciembre 2009.
- [23] C. A. Wall, P. L. Arnera, and B. Barbieri, *Use of magnetic field calculation tools to design MV/LV substations*. En: CIRED, 23th International Conference on Electricity Distribution.

Índice de figuras

3.1. Campo magnético generado por un conductor recto	16
3.2. Línea trifásica considerada	18
3.3. Distancias consideradas para el cálculo de la impedancia serie de una línea	19
3.4. Primera ecuación cardinal en un diferencial de hilo	20
3.5. Parámetros involucrados en la ecuación de la catenaria	21
3.6. Sistema de coordenadas para la aproximación parabólica	22
3.7. Configuración de catenaria con pequeño desnivel	23
3.8. Condiciones de borde de \vec{B} y \vec{H}	25
4.1. Configuración de la doble terna	34
4.2. Comparación valores medidos vs simulados	35
4.3. Disposición geométrica de las líneas aéreas	36
4.4. 3 Niveles	38
4.5. 2 Niveles	38
4.6. 1 Nivel	39
4.7. Configuración de la línea de transmisión y la cerca	40
4.8. Comparación perfil de densidad de flujo magnético CEDIMET vs SOFTWARE COMERCIAL	42
4.9. Comparación perfil de densidad de flujo magnético CEDIMET vs SOFTWARE COMERCIAL - Catenaria	43
4.10. Comparación perfil de campo magnético CEDIMET vs SOFTWARE COMERCIAL	43
4.11. Línea aérea de 15 kV normalizada	44
4.12. Simulación del campo magnético generado suponiendo la línea rectilínea e infinita	46
4.13. Simulación de la densidad de flujo magnético generado considerando la catenaria y un único vano	47
4.14. Longitudes del vano considerado y los vanos adyacentes	47
4.15. Simulación de la densidad de flujo magnético generado considerando la catenaria y los dos vanos adyacentes	47
4.16. Comparación medidas vs simulación con tres vanos	49
4.17. Corriente RMS para cada punto medido	49
4.18. Comparación medidas vs simulación con tres vanos y vector de corrientes	50
4.19. Perfil de elevación del suelo	50
4.20. Simplificación del perfil del suelo	51
4.21. Comparación medidas vs simulación con tres vanos, vector de corrientes y perfil de elevación del suelo	51
4.22. Comparación medidas vs simulación con tres vanos, vector de corrientes y perfil de elevación del suelo	52
5.1. Flujo disperso en un transformador	53

Índice de figuras

5.2. Campo magnético de dispersión	54
5.3. Campo de dispersión en las cercanías de un transformador de 630 kVA	57
5.4. Campo de dispersión generado por el transformador vs campo de dispersión generado por el sistema de barras de las terminales de baja tensión	58
5.5. Corte transversal de la columna del núcleo	60
5.6. Curva de magnetización del hierro silicio de grano orientado del núcleo	60
5.7. Bobinas primaria y secundaria del transformador	61
5.8. Cuba del transformador considerado	61
5.9. Vista superior de la cuba del transformador	62
5.10. Densidad de flujo magnético en Tesla producido por una bobina	66
5.11. Densidad de flujo magnético en Tesla inducido en el núcleo	67
5.12. Cortes de la columna del transformador considerados	70
5.13. Representación del primer modelo	71
5.14. Gráfico de densidad de flujo magnético alrededor del transformador obtenido de CEDIMET	72
5.15. Vista superior de las medidas a tomar	73
5.16. Curvas B-H y μ -H	74
5.17. Representación del segundo modelo	75
5.18. Gráfico de densidad de flujo magnético alrededor del transformador para el segundo modelo obtenido de CEDIMET	75
5.19. Representación del tercer modelo	76
5.20. Gráfico de densidad de flujo magnético alrededor del transformador para el tercer modelo obtenido de CEDIMET	77
5.21. Detalle flujo de fugas frente a laterales de aleta	78
5.22. Representación del cuarto modelo	78
5.23. Gráfico de densidad de flujo magnético alrededor del transformador para el cuarto modelo obtenido de CEDIMET	79
5.24. Distribución de la densidad de flujo magnético a lo largo del eje radial	80
5.25. Distribución de la densidad de flujo magnético a lo largo del eje radial	83
6.1. Plano de la subestación considerada	92
6.2. Tableros BT	93
6.3. Densidad de flujo magnético simulada en la subestación 6.1	94
B.1. Pantalla inicial	107
B.2. Líneas y Transformadores	107
B.3. Simple terna y Doble terna	108
B.4. Simple terna y Doble terna	108
B.5. Ventana emergente de longitud de vano	108
B.6. Simple terna sin hilo de guardia conociendo el largo del vano	109
B.7. Simple terna sin hilo de guardia	109
B.8. Simple terna con hilo de guardia	110
B.9. Menú de opciones	110
B.10. Ventana emergente densidad de flujo magnético a 1 m del transformador	111
B.11. Calculo de cotas	111
B.12. Elegir transformador	112
B.13. Transformador 250 kVA 15/0,4 – 0,23 kV	112

Índice de tablas

2.1. Restricciones básicas para la exposición humana a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo	13
2.2. Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos . .	14
2.3. Niveles de referencia para exposición poblacional a campos eléctricos y magnéticos . .	14
4.1. Posiciones de las fases	33
4.2. Valores medidos y valores simulados con CEDIMET	34
4.3. Desviación máxima de valores y eje de simetría	35
4.4. Coordenadas para cada terna	36
4.5. 12 casos y sus tres variantes para la asignación de fases en una doble terna	37
4.6. Parámetros de entrada	37
4.7. Resultados extraídos de la publicación vs resultados simulados por CEDIMET	39
4.8. Valores de campo magnético medidos a lo largo del eje z	48
5.1. Valores máximos medidos de densidad de flujo magnético en los alrededores del transformador	56
5.2. Medidas del ruido magnético del medio a 50Hz	73
5.3. Medidas de densidad de flujo magnético en ensayo de cortocircuito del transformador 250 kVA 15/0,4 – 0,23 kV	73
5.4. Vista frontal - Primer modelo	74
5.5. Vista lateral - Primer modelo	74
5.6. Vista frontal - Segundo modelo	76
5.7. Vista lateral - Segundo modelo	76
5.8. Vista frontal - Tercer modelo	77
5.9. Vista lateral - Tercer modelo	77
5.10. Vista frontal - Cuarto modelo	79
5.11. Vista lateral - Cuarto modelo	79
5.12. Transformador 2300 kVA - Vista frontal	81
5.13. Transformador 2300 kVA - Vista lateral	81
5.14. Transformador 2700 kVA - Vista frontal	81
5.15. Transformador 2700 kVA - Vista lateral	81
5.16. Frente del transformador - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1400	84
5.17. Lateral del transformador - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1400	84
5.18. Frente del transformador - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1350	85
5.19. Lateral del transformador - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1350	85
5.20. Frente del transformador - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1300	85
5.21. Lateral del transformador - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1300	85
5.22. Frente del transformador 2300 kVA - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1350	85
5.23. Lateral del transformador 2300 kVA - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1350	86

Índice de tablas

5.24. Frente del transformador 2700 <i>kVA</i> - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1350	86
5.25. Lateral del transformador 2700 <i>kVA</i> - Permeabilidad magnética relativa de la cuba 1350	86
5.26. Errores máximos de las simulaciones de los tres transformadores ensayados	87
5.27. Perfil de densidad de flujo magnético a lo largo de un eje horizontal - Medidas EPRI .	88
6.1. Corrientes consideradas en las simulaciones de la figura 6.3	95

Esta es la última página.
Compilado el lunes 7 noviembre, 2016.
<http://iie.fing.edu.uy/>