



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE 230 kV**

Marvin Josué Padilla Vásquez

Asesorado por el Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

Guatemala, febrero de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE 230 KV**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARVIN JOSUÉ PADILLA VÁSQUEZ

ASESORADO POR EL ING. GUILLERMO ANTONIO PUENTE ROMERO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Bayron Armando Cuyan Culajay
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Romero Neftalí López Orozco
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE 230 KV

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 13 de noviembre de 2012.



Marvin Josué Padilla Vásquez

Guatemala, 11 de noviembre de 2013.

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador de Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Ingeniero González:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: "MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE 230 kV", desarrollado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica, Marvin Josué Padilla Vásquez con carné No. 2008-19054, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos, por lo que el autor y mi persona somos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,



Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
ASESOR
Colegiado 5898

Guillermo A. Puente R.
INGENIERO ELECTRONICO
COL. # 5898



Ref. EIME 01. 2014
Guatemala, 15 de ENERO 2014.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CAMPOS
ELECTROMAGNÉTICOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA DE 230 kV, del estudiante Marvin Josué
Padilla Vásquez, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador Área Potencia



S/O



REF. EIME 01. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; MARVIN JOSUÉ PADILLA VÁSQUEZ titulado: MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE 230 kV, procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 20 DE ENERO 2,014.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 055.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE 230 kV**, presentado por el estudiante universitario **Marvin Josué Padilla Vásquez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Alfredo Beber Aceituno'.

Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
Decano en Funciones

Guatemala, 11 de febrero de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por estar conmigo a cada momento, guiarme por el buen camino de la paz y la salvación.
- Mi papá** Marvin A. Padilla por guiarme en el camino correcto, tus consejos y tu apoyo incondicional. A pesar de la distancia que nos ha separado por muchos años nunca dejaste de estar pendiente de nuestra familia.
- Mi mamá** María Eugenia Vásquez, gracias por ser una madre cariñosa, dedicada a mí y mis hermanos, por todos los consejos que día a día me han ayudado a lo largo de mi carrera.
- Mis hermanos** Lesly Arely y Roger Emanuel Padilla Vásquez por su amistad, cariño y apoyo incondicional en todo momento.
- Mis abuelos** Inocente Padilla, Santiago Vásquez y Albertina Samayoa de Padilla por su cariño y apoyo incondicional en todo momento.

Mis tíos

Héctor, Hugo, Clemencia, Guillermo, Lilian, Natalia, Amanda, Juventino e Isabel Vásquez López, Elmer, David y Emma Padilla, Margarita López de Padilla y Maria de la Cruz de Padilla, por su apoyo y palabras de aliento durante todo este tiempo para que lograra mis metas.

Mis primos

Por cada uno de los momentos felices que compartimos hasta el día de hoy.

Mis amigos

Telma Mejía, Elvira Castellanos, Lia Boiton, Ricardo y Daniel Vásquez, Juan Pablo Soria, Erick Pérez, Roberto Castellanos, Josué García, Gabriel Velásquez, Eliu González, Carlos Noriega, Andy Méndez, Paulo Martínez, Acner Cano, Lenin Calderón, Francisco Poz, Víctor Gómez, Héctor López, Eddy Girón, Justiniano Lucas, Jorge Gallina, Bryan Villela, Claudio Morales, José Ángel Muralles, Javier Pérez, Hugo Palencia, Oscar Choc, gracias por su amistad.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por enseñarme el camino de la sabiduría y la felicidad, siento que sin ti no podría llegar a ningún lado. Te agradezco por todo lo que me has dado en esta vida. Ilumina mi camino siempre.
Mis padres	Quienes con sus ejemplos me han instruido desde pequeño para ser un buen amigo para las personas que me han conocido.
Mi familia	Por brindarme todo su apoyo y colaboración incondicionalmente en cada una de mis metas que he alcanzado.
Mis amigos	Por todos los buenos momentos compartidos durante la carrera de universitaria.
Todos mis catedráticos	Por compartirme sus valiosos conocimientos, experiencias y sobre todo su amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. CONCEPTOS BÁSICOS Y GENERALIDADES.....	1
1.1. Campo eléctrico	1
1.1.1. Intensidad de campo eléctrico E	1
1.1.2. Campos eléctricos debidos a distribuciones continuas de carga	2
1.1.3. Densidad de flujo eléctrico.....	3
1.1.4. Ley de Gauss para el campo eléctrico.....	4
1.1.5. Potencial eléctrico.....	4
1.1.6. Relación entre campo eléctrico y diferencia de potencial	6
1.1.7. Líneas de flujo eléctrico	8
1.2. Campo magnético	10
1.2.1. Flujo magnético	10
1.2.2. Líneas de campo magnético.....	12
1.2.3. Ley de Gauss para campos magnéticos.....	13
1.2.4. Campos magnéticos cambiantes, inducción y ley de Faraday	14
1.2.5. Acoplamiento e inductancia mutua	15

1.3.	Propagación de ondas electromagnéticas	16
1.3.1.	Estudio general de las ondas	16
1.3.2.	Propagación de ondas en dieléctricos disipativos.....	17
1.3.3.	Ondas planas en el vacío	20
1.3.4.	Ondas planas en buenos conductores	22
1.3.5.	Potencia y vector de Poynting.....	22
2.	PARÁMETROS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN	25
2.1.	Resistencia	25
2.2.	Conductancia.....	27
2.3.	Inductancia línea monofásica de dos conductores y línea trifásica.....	28
2.4.	Inductancia: conductores compuestos, espaciamento desigual entre fases, conductores en haz	31
2.5.	Impedancia en serie: línea trifásica con conductores neutros y retorno a tierra.....	33
2.6.	Campo eléctrico y tensión.....	35
2.7.	Capacitancia: línea monofásica de dos conductores y línea trifásica de tres conductores con espaciamento igual entre fases	39
2.8.	Admitancias en derivación: líneas con conductores neutros y retorno por tierra.....	42
2.9.	Intensidad de campo eléctrico en las superficies de los conductores y al nivel del suelo	46
3.	RADIACIÓN.....	49
3.1.	Radiación Ionizante.....	49
3.2.	Radiación no Ionizante.....	49

3.1.1.	Frecuencias típicas de fuentes de radiación no ionizante (RNI) generadas por el hombre en aplicaciones industriales, telecomunicación y transporte de energía	50
3.3.	Radiación no ionizante y sus efectos en la salud	51
4.	MODELACIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	57
4.1.	Método de las imágenes.....	57
4.2.	Parámetros necesarios para la determinación de los campos electromagnéticos	60
4.3.	Determinación del campo eléctrico.....	64
4.4.	Determinación del campo magnético	74
	CONCLUSIONES	83
	RECOMENDACIONES.....	85
	BIBLIOGRAFÍA.....	87
	APÉNDICES	89
	ANEXOS	103

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diversas distribuciones de carga y elementos de carga.....	3
2.	Desplazamiento de una carga puntual Q en un campo electroestático	6
3.	Naturaleza conservativa de un campo electrostático	7
4.	Superficie equipotencial para (a) una carga puntual y (b) un dipolo eléctrico	9
5.	Vectores S y B para la densidad del flujo magnético	11
6.	Líneas de campo magnético	12
7.	Espira de circuito abierto con voltaje en sus terminales debido a un cambio en el flujo magnético a través de la espira	15
8.	Campo E con la componente x en desplazamiento a lo largo de la dirección $+z$	19
9.	Diagrama de E y H como funciones de z en $t = 0$	21
10.	Ilustración del equilibrio de potencia en campos electromagnéticos ...	23
11.	Campo magnético interno de un conductor cilíndrico sólido	28
12.	Campo magnético externo de un conductor cilíndrico sólido	29
13.	Arreglo de M conductores cilíndricos sólidos.....	30
14.	Línea monofásica de dos conductores con conductores compuestos	32
15.	Línea de transmisión trifásica con la tierra reemplazada por conductores de retorno.....	34
16.	Conductor cilíndrico sólido de conducción perfecta y con distribución uniforme de carga.....	37

17.	Arreglo de M conductores cilíndricos sólidos	39
18.	Línea monofásica de dos conductores.....	40
19.	Línea trifásica de tres conductores con igual espaciamiento de fases	41
20.	Método de las imágenes	43
21.	Línea trifásica con conductores neutros y con el plano terrestre reemplazado por conductores imagen	45
22.	Adición vectorial de los campos eléctricos en la superficie de uno de los conductores en un haz	47
23.	Espectro electromagnético.....	51
24.	Campos equivalentes debido a un eje cargado y a un conductor cilíndrico con igual carga.....	58
25.	Campo debido a dos cargas iguales de signo opuesto.....	59
26.	Eliminación de la tierra	59
27.	Altura mínima del conductor más baja en una torre de transmisión.....	61
28.	Campo eléctrico en un punto debido a un conductor considerando el efecto de la Tierra	66
29.	Campo eléctrico bajo una línea de transmisión.....	70
30.	Parte de una región que contiene un campo de potencial bidimensional dividido en cuadrados con longitud h por lado	71
31.	Campo eléctrico bajo una línea de transmisión de 230 kV por medio del método numérico	73
32.	Campo magnético H alrededor de un alambre portador de corriente	76
33.	Campo magnético H para una línea de transmisión de dos conductores.....	77
34.	Campo magnético en líneas de transmisión 230 kV	80
35.	Campo magnético de la línea de transmisión de 230 kV de S/E Los Brillantes hacia S/E Palo Gordo	81

TABLAS

I.	Resistividades de la tierra y distancias equivalentes de los conductores a 60 <i>Hertz</i>	35
II.	Ejemplos de intensidad máxima del campo eléctrico al nivel del suelo contra la tensión en la línea de transmisión	48
III.	Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)	53
IV.	Niveles de referencia para exposición poblacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)	54
V.	Niveles de referencia a 60 <i>Hertz</i>	55
VI.	Vanos	60
VII.	Distancias mínimas de seguridad verticales de conductores sobre vías férreas, el suelo o agua	62
VIII.	Tensión máxima de diseño.....	63
IX.	Datos para la simulación en Matlab	64
X.	Capacitancias con efecto de tierra	65
XI.	Datos de la línea Los Brillantes – Palo Gordo	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
β	Ángulo de la corriente
θ	Ángulo de la impedancia
δ	Ángulo de voltaje
A	Área
C	Capacitancia
q	Carga
B	Coefficiente de pérdidas
Γ	Coefficiente de reflexión o de refracción
G	Conductancia
$i(t)$	Corriente instantánea
D	Distancia
λ	Enlaces de flujo magnético
f.p.	Factor de potencia
Y	Fasor de admitancias
I	Fasor de corriente
β	Fasor de densidad de flujo magnético
E	Fasor de densidad del campo eléctrico
Z	Fasor de impedancia
H	Fasor de intensidad de campo magnético
V	Fasor de voltaje
E	Fasor de voltaje de la fuente
Φ	Flujo magnético

ω	Frecuencia en radianes
L	Inductancia
kVA	kilovoltio-amperio
kV	kilovoltio
l	Longitud
I	Magnitud de corriente
V	Magnitud de voltaje (rms)
Z	Matriz de impedancias
L	Matriz de inductancias
X	Matriz de reactancias
R	Matriz de resistencias
A	Matriz de transformación de componentes simétricas
α	Operador $1\angle 120^\circ$
j	Operador $1\angle 90^\circ$
s	Operador de Laplace
T	Par
A	Parámetro de la línea de transmisión
B	Parámetro de la línea de transmisión
C	Parámetro de la línea de transmisión
D	Parámetro de la línea de transmisión
T	Periodo
μ	Permeabilidad
ϵ	Permitividad
S	Potencia aparente
S	Potencia compleja
Q	Potencia reactiva
P	Potencia real

r	Radio
X	Reactancia
ρ	Resistividad
$v(t)$	Tensión instantánea
t	Tiempo
τ	Tiempo de recorrido de la línea de transmisión
I	Vector de fasores de corriente
V	Vector de fasores de voltaje
v	Velocidad de propagación

GLOSARIO

Acoplamiento	El resultado de la interferencia de una señal no deseada entre los circuitos.
Amperio	Unidad de medida de la corriente eléctrica, que debe su nombre al físico francés André Marie Ampere, y representa el número de cargas (coulombs), por segundo que pasan por un punto de un material conductor. (1 amperio = 1 coulombs/segundo).
Campo eléctrico	Campo físico representado mediante un modelo que describe la interacción entre cuerpos y sistemas con propiedades de naturaleza eléctrica.
Campo magnético	Descripción matemática de la influencia magnética de las corrientes eléctricas y de los materiales magnéticos.
Carga eléctrica	Propiedad física intrínseca de algunas partículas subatómicas que se manifiesta mediante fuerzas de atracción y repulsión entre ellas.

Catenaria	Curva que adopta una cadena, cuerda o cable ideal perfectamente flexible, con masa distribuida uniformemente por unidad de longitud, suspendida por sus extremos y sometida a la acción de un campo gravitatorio uniforme.
Conductancia	Pérdida de potencia real entre conductores o entre los conductores y la tierra.
Corriente eléctrica	Tasa de flujo de carga que pasa por un determinado punto de un circuito eléctrico, medido en culombios/segundo.
Corriente eléctrica alterna	El flujo de corriente en un circuito que varía periódicamente de sentido. Se le denota como corriente AC (<i>altern current</i>) o CA (Corriente alterna).
Dieléctrico disipativos	Medio en el que una onda electromagnética pierde potencia al propagarse a causa de una conducción deficiente.
Diferencia de potencial	Trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico sobre una partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas.
Electricidad	Fenómeno físico resultado de la existencia e interacción de cargas eléctricas. Cuando una carga es estática, esta produce fuerzas sobre objetos en

regiones adyacentes y, cuando se encuentra en movimiento producirá efectos magnéticos.

Flecha	Distancia vertical medida en el centro de un vano entre la cota del hilo de contacto en ese punto y en los apoyos anterior y posterior.
Flujo magnético	Número de líneas de fuerza de campo magnético que atraviesa una superficie determinada y depende de cómo esté orientada dicha superficie con respecto a la dirección de las líneas.
Frecuencia	Magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.
Impedancia	Oposición al paso de la corriente alterna. A diferencia de la resistencia, esta incluye los efectos de acumulación y eliminación de carga (capacitancia) e/o inducción magnética (inductancia).
Inductancia mutua	Razón de voltaje generada en el circuito por la razón de cambio de la corriente en otro circuito.
Kilo	Prefijo que implica (1) multiplicar por mil el valor correspondiente.

kVA	Potencia aparente expresada en mil voltio-amperios. El kilovoltio-amperio designa la potencia de salida que puede generar un transformador a tensión y frecuencia nominales, sin superar un aumento de temperatura determinado. También puede ser medida en flujo de potencia reactiva y se produce cuando la tensión y la corriente no están totalmente sincronizados o en fase.
kW	Potencia activa o efectiva expresada en kilovatios (kW).
Líneas de flujo eléctrico	Trayectoria o línea imaginaria trazada de tal manera que su dirección en cualquier punto sea la dirección del campo eléctrico en ese punto.
Paso de servidumbre	Gravamen impuesto sobre un predio para uso de otro predio de distinto dueño o para utilidad pública o comunal.
Potencia activa	Término utilizado para potencia cuando es necesario distinguir entre potencia aparente, potencia compleja y sus componentes, y potencia activa y reactiva.
Potencia aparente (voltio-amperios)	Producto de la tensión y la corriente aplicada en un circuito de corriente alterna. La potencia aparente, o voltio-amperios, no es la potencia real del circuito,

ya que en el cálculo no se considera el factor de potencia.

Radiación Ionizante

Aquellas en las que partículas que se desplazan son iones.

Radiación no Ionizante

Aquellas en las que no interviene iones, las radiaciones están compuestas por cuantos de luz sin energía suficiente para romper los enlaces moleculares.

Resistencia

Oposición que tienen los electrones para desplazarse a través de un conductor. La unidad de resistencia en el sistema internacional es el ohmio, que se representa con la letra griega omega (ω),

Superficie equipotencial

Es cualquier superficie con igual potencial en cualquier punto de esa misma superficie.

Voltímetro

Es un instrumento utilizado para medir la diferencia de voltaje de dos puntos distintos y su conexión dentro de un circuito eléctrico es en paralelo.

Vano

Distancia horizontal entre dos estructuras consecutivas.

Watt

Es la unidad de potencia de un elemento receptor de energía (radio, televisor). Es la energía consumida por un elemento y se obtiene de multiplicar voltaje por corriente.

RESUMEN

En este trabajo de graduación se plantea una metodología para encontrar de una manera analítica los campos electromagnéticos creados por las líneas de transmisión existentes en la red de transmisión de Guatemala, para este caso, líneas de transmisión de un nivel de voltaje de 230 kV.

En el capítulo I se presentan los conceptos fundamentales para el estudio del electromagnetismo, empezando por el campo eléctrico en el vacío y terminado con el campo magnético creado por una espira. El análisis de la onda electromagnética en el vacío y en una línea de transmisión de longitud infinita y el análisis de métodos para el desarrollo eficiente sobre el efecto de la tierra sobre los campos eléctricos.

En el capítulo II se desarrollan los cuatro parámetros básicos de las líneas de transmisión, los cuales son la resistencia serie, la inductancia serie, la capacitancia en derivación y la conductancia en derivación; así como, los campos eléctricos y magnéticos creados en las líneas de transmisión. En el desarrollo de la capacitancia se verá el efecto que se presenta la tierra sobre esta y dentro de las mismas fases de la línea, en la inductancia se verá el efecto que se tiene en la inductancia mutua sobre las mismas fases de la línea y con respecto de la tierra.

En el capítulo III se desarrollan los conceptos de radiaciones ionizantes y no ionizantes, así como el análisis de los niveles permisibles de radiaciones no ionizantes para la exposición poblacional y ocupacional aprobados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

En el capítulo IV se presenta el desarrollo de los datos y ecuaciones necesarias para el análisis de los campos electromagnéticos de la línea de transmisión con respecto a tierra, dentro de los cuales son las especificaciones de estructuras de las líneas de transmisión, el tipo de conductor, las distancias de separación en vertical de las líneas de transmisión con respecto al suelo, y en el último caso, un ejemplo real de los niveles de campo magnético basados en un horario específico.

OBJETIVOS

General

Realizar una propuesta para el modelo de la distribución espacial de campos electromagnéticos en líneas de transmisión de energía eléctrica de 230 kV.

Específico

1. Presentar los conceptos básicos y generalidades de los campos electromagnéticos.
2. Presentar los parámetros generales del modelo de la línea de transmisión.
3. Presentar los fundamentos de radiaciones ionizantes y no ionizantes.
4. Presentar la propuesta del modelo de los campos electromagnéticos en la línea de transmisión de 230 kV.

INTRODUCCIÓN

Los campos eléctricos y magnéticos en el estudio de la física se denomina campo a la zona del espacio donde se manifiestan fuerzas, por ejemplo: el campo gravitatorio sería la zona donde hay una fuerza gravitatoria, responsable de que los cuerpos tenga un determinado peso. Asimismo, un campo electromagnético es una zona donde existen campos eléctricos y magnéticos, creados por las cargas eléctricas y su movimiento, respectivamente.

Actualmente, el ser humano esta expuesto a numerosos tipos de campos electromagnéticos de origen artificial, radiofrecuencias utilizadas en la telefonía celular, ondas de radio y televisión, sistemas antirrobo, detectores de metales, radares, mandos a distancia, comunicación inalámbrica, líneas de transmisión, entre otros.

Todos ellos forman parte del espectro electromagnético y se diferencian en su frecuencia, que determina tanto sus características físicas como los efectos biológicos que pueden producir en los organismos expuestos.

La presencia de líneas de transmisión cerca de zonas de población, por lo regular en área rural, ha hecho que surjan cuestionamientos y preocupación sobre los riesgos que puede tener ante la emisión de campos electromagnéticos, siendo más exactos aquellos de baja frecuencia 60 Hertz, utilizados en la república de Guatemala. Las líneas de transmisión generan campos electromagnéticos, que dependen del nivel de tensión y la carga eléctrica que transporta.

Debido a estas inquietudes es necesario que se realicen estudios necesarios para establecer los niveles de campos electromagnéticos existentes en los sistemas actuales de transmisión de energía eléctrica y, así como, para futuros proyectos de transporte de energía eléctrica.

Con este propósito se hace necesario realizar una modelación sobre la distribución espacial de los campos electromagnéticos (CEM) existentes en las líneas de transmisión, que actualmente se encuentra en funcionamiento dentro de la república de Guatemala.

Esta modelación permitirá verificar los niveles de Radiaciones No Ionizantes (RNI) producidas por los CEM, medidos mediante instrumentos específicos para este fin, y ampliar la evaluación a otros puntos que no pueden ser evaluados de manera experimental y la poca accesibilidad a algunos puntos de medición.

1. CONCEPTOS BÁSICOS Y GENERALIDADES

Los conceptos fundamentales para el estudio del electromagnetismo empezando por el campo eléctrico en el vacío, y terminado con el campo magnético son utilizados hoy en día en aplicaciones importantes tanto para la tecnología, así como, para la salud. Un campo electrostático es producido por una distribución de carga estática. El movimiento de cargas a una velocidad constante produce a su vez un campo magnético estático.

1.1. Campo eléctrico

Es la fuerza por unidad de carga que se ejerce sobre una carga prueba positiva q colocada en dicho punto. El campo eléctrico describe un campo vectorial, en el cual un grupo de cargas sufren los efectos debidos a fuerzas que mueven dichas cargas.

1.1.1. Intensidad de campo eléctrico \vec{E}

La intensidad de campo eléctrico \vec{E} es la fuerza por unidad de carga en el campo eléctrico.

Así:

$$\vec{E} = \lim_{Q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{Q}$$

O simplemente:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$$

La intensidad de campo eléctrico \vec{E} es, obviamente, de dirección igual a la de la fuerza \vec{F} y se mide en *newton/coulomb* o V/m. la intensidad de campo eléctrico en el punto r debida a una carga puntual localizada en un sistema de coordenadas esférico r' se obtiene fácilmente de las ecuaciones de la siguiente manera:

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \vec{a}_R = \frac{Q(\vec{r} - \vec{r}')}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r} - \vec{r}'|^3}$$

La constante ϵ_0 se conoce como permitividad del vacío (en *farad* por metro) y posee el valor:

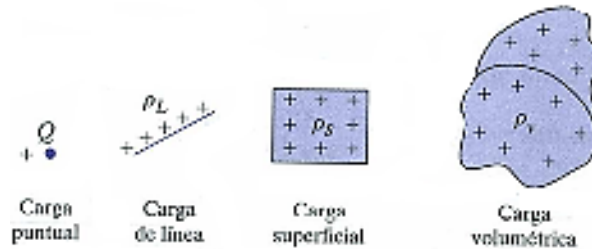
$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \cong \frac{10^{-9} \text{ F}}{36\pi \text{ m}}$$

1.1.2. Campos eléctricos debidos a distribuciones continuas de carga

Los campos eléctricos se pueden considerar también, como una distribución continua de carga a lo largo de una línea, sobre una superficie o en un volumen como se ilustra en la figura 1.

Se acostumbra denotar la densidad de carga lineal o carga de línea, la densidad de carga superficial y la densidad de carga volumétrica con ρ_L (en C/m), ρ_s (en C/m²) y ρ_v (en C/m³), respectivamente.

Figura 1. **Diversas distribuciones de carga y elementos de carga**



Fuente: SADIKU, Matthew N.O. Elementos de electromagnetismo. p. 111.

La intensidad de campo eléctrico debido a cada una de las distribuciones de carga ρ_L , ρ_S y ρ_v , puede considerarse como la sumatoria del campo al que contribuyen las numerosas cargas puntuales que componen la distribución de carga.

1.1.3. Densidad de flujo eléctrico

Un nuevo campo vectorial \vec{D} independiente del medio esta definido por:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$$

Se define el flujo eléctrico ψ en términos de \vec{D} usando la siguiente ecuación, es decir:

$$\psi = \int \vec{D} \cdot d\vec{S}$$

En unidades del sistema internacional (SI), una línea de flujo eléctrico emana de +1 C y termina en -1 C. En consecuencia, el flujo eléctrico se mide en *coulombs*. Así, el campo vectorial D se llama densidad de flujo eléctrico y se

mide en *coulombs* por metro cuadrado. La densidad de flujo eléctrico también se le conoce como desplazamiento eléctrico.

1.1.4. Ley de Gauss para el campo eléctrico

La ley de Gauss es una de las leyes fundamentales del electromagnetismo. La ley de Gauss establece que el flujo eléctrico neto ψ que sale de cualquier superficie cerrada es igual a la carga total encerrada por esa superficie.

Por tanto, el flujo es numéricamente igual a la carga:

$$\psi = Q_{encerrada}$$

Esto es:

$$\psi = \oint d\psi = \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}$$

La ley de Gauss aporta un medio simple para hallar \vec{E} o \vec{D} , en el caso de distribuciones de carga simétricas como las de carga puntual, carga de línea infinita, carga superficial cilíndrica infinita y distribución esférica de carga. Una distribución continua de carga posee simetría rectangular si solo depende de x (o y o z), simetría cilíndrica si solo depende de ρ (radio de la superficie cilíndrica) y simetría esférica si solo depende de r (es independiente de θ y ϕ).

1.1.5. Potencial eléctrico

La intensidad de campo eléctrico \vec{E} debida a una distribución de carga puede obtenerse de la ley de Coulomb en la generalidad de los casos o de la

ley de Gauss cuando la distribución de carga es simétrica. Sin embargo, también es posible obtener \vec{E} a partir del potencial escalar eléctrico V .

Así, el trabajo realizado total o la energía potencial requerida, para mover Q de A a B es:

$$W = -Q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

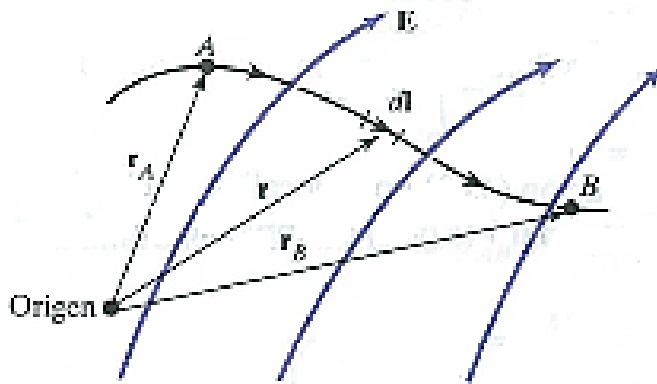
La división de W entre Q en la ecuación anterior, da como resultado la energía potencial por unidad de carga. Esta unidad, denotada con V_{AB} , se conoce como diferencia de potencial entre los puntos A y B . Así:

$$V_{AB} = \frac{W}{Q} = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Conviene destacar lo siguiente:

- Al determinar V_{AB} , A es el punto inicial y B es el final.
- Si V_{AB} es negativo, hay una pérdida de energía potencial en el desplazamiento de Q de A a B ; esto implica que el trabajo es realizado por el campo. Si, en cambio V_{AB} es positivo, hay una ganancia de energía potencial en el desplazamiento; un agente externo realiza el trabajo.
- V_{AB} es independiente de la trayectoria adoptada.
- V_{AB} se mide en Joule por coulomb, unidad comúnmente llamada *volt* (V).

Figura 2. **Desplazamiento de una carga puntual Q en un campo electroestático**



Fuente: SADIKU, Matthew N.O. Elementos de electromagnetismo. p. 133.

El potencial en cualquier punto es la diferencia de potencial entre ese punto y un punto elegido como referencia en el que el potencial sea cero.

1.1.6. Relación entre campo eléctrico y diferencia de potencial

La diferencia de potencial entre los puntos A y B es independiente de la trayectoria adoptada. Es decir que no importa el punto en el cual se inicie y finalice la trayectoria al final se obtiene el mismo potencial pero con sentido distinto. Por tanto:

$$V_{BA} = -V_{AB}$$

Esto es: $V_{BA} + V_{AB} = \oint E \cdot dl = 0$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

Esto indica que, como se muestra en la figura 3, la integral de línea \vec{E} a lo largo de una trayectoria cerrada debe ser cero. En términos físicos, esto implica que en un campo electrostático el desplazamiento de una carga a lo largo de una trayectoria cerrada no supone la realización de ningún trabajo neto. La aplicación del teorema de Stokes a la ecuación anterior da como resultado:

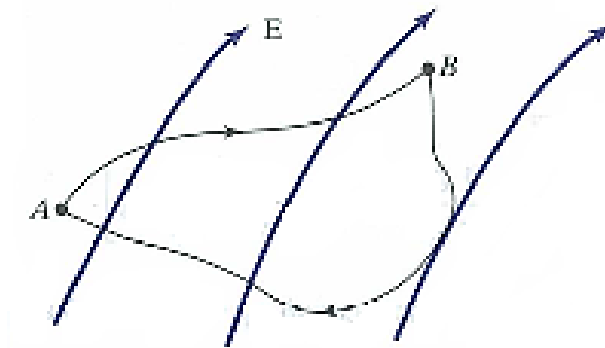
$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_S (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} = 0$$

O:

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

De todo campo vectorial que satisface las ecuaciones anteriores se dice que es conservativo o irrotacional. Así, un campo electrostático es un campo conservativo.

Figura 3. **Naturaleza conservativa de un campo electrostático**



Fuente: SADIKU, Matthew N.O. Elementos de electromagnetismo. p. 139.

De la definición de potencial, $V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{l}$, se deduce que:

$$dV = -\vec{E} \cdot d\vec{l} = -E_x dx - E_y dy - E_z dz$$

Pero:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial z} dz$$

Así:

$$\vec{E} = -\nabla V$$

Lo cual quiere decir que la intensidad de campo eléctrico es el gradiente V . El signo negativo indica la dirección de E es la opuesta a la dirección del incremento de V ; E se dirige de niveles superiores a niveles inferiores de V .

1.1.7. Líneas de flujo eléctrico

La idea de líneas de flujo eléctrico (o líneas eléctricas de fuerza, como también se les llama) fue propuesta por Michael Faraday (1791-1867), en sus investigaciones experimentales, como una forma de visualizar el campo eléctrico.

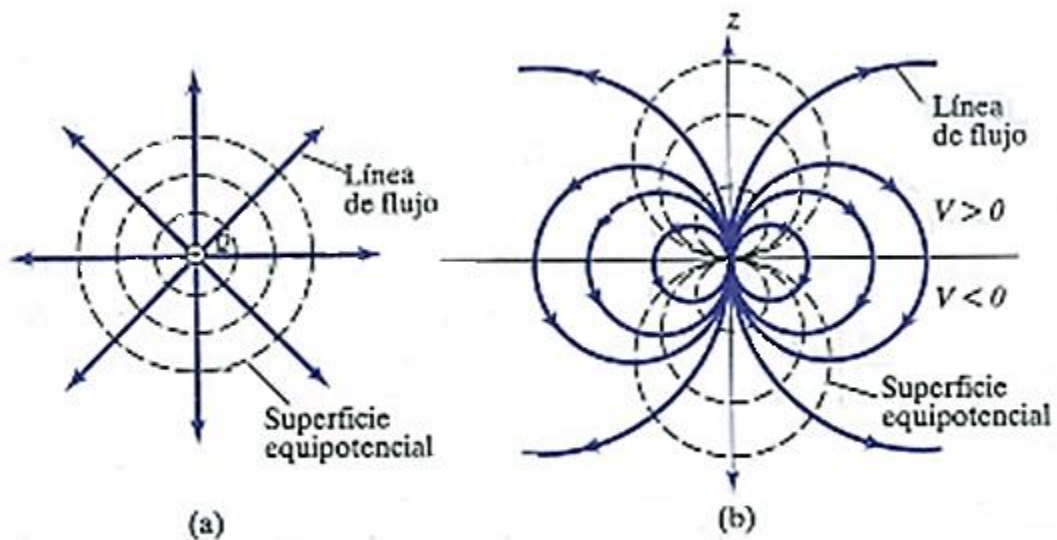
Una línea de flujo eléctrico es una trayectoria o línea imaginaria trazada de tal manera que su dirección en cualquier punto sea la dirección del campo eléctrico en ese punto. En otras palabras, las líneas de flujo son las líneas a las cuales la densidad de campo eléctrico D es tangencial en cualquier punto.

Toda superficie con igual potencial en cualquier punto se conoce como superficie equipotencial. La intersección de una superficie equipotencial y un plano resulta en una trayectoria o línea llamada línea equipotencial. El desplazamiento de una carga de un punto a otro a lo largo de una línea o superficie equipotencial ($V_A - V_B = 0$) no implica la realización de trabajo alguno, y de ahí que:

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

En la figura 4 se muestran ejemplos de superficies equipotenciales con relación a una carga puntual y un dipolo. Nótese en estos ejemplos que la dirección de E es normal en todas partes a las líneas equipotenciales.

Figura 4. **Superficie equipotencial para (a) una carga puntual y (b) un dipolo eléctrico**



Fuente: SADIKU, Matthew N.O. Elementos de electromagnetismo. p. 144.

1.2. Campo magnético

Los campos magnéticos resultan del movimiento de las cargas, es decir, de corrientes eléctricas, y determinan el movimiento de las cargas. El campo magnético es una magnitud vectorial, por lo tanto tiene módulo, dirección y sentido. La intensidad del campo magnético H se mide en amperios por metro (A/m), aunque suele expresarse en función de la inducción magnética que produce la densidad de flujo magnético B , medida en teslas (T). Además se puede utilizar otra medida que se denomina gauss (G).

Los campos magnéticos no pueden apantallarse y atraviesan casi todos los materiales conocidos.

$$\oint_C B \cdot dl = \mu_0 \int_S J \cdot dS$$

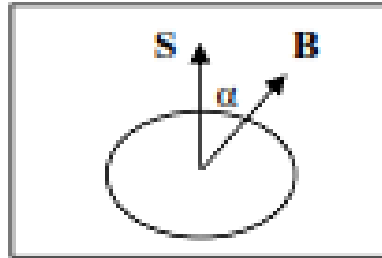
1.2.1. Flujo magnético

El flujo magnético puede entenderse como el número de líneas de fuerza de campo magnético que atraviesa una superficie determinada y depende de cómo esté orientada dicha superficie con respecto a la dirección de las líneas. En términos matemáticos se expresa en la forma:

$$\psi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Donde α es el ángulo que forman las líneas de fuerza del vector B con la perpendicular a la superficie (ver figura 5).

Figura 5. **Vectores S y B para la densidad del flujo magnético**



Fuente:

http://www.dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/278/3/Capitulo1_Medicion_y_simulacion_de_campos_electromagneticos_de_subestaciones_EERCS.pdf. Consulta: 7 de julio de 2013.

La expresión matemática del coseno muestra que el flujo varía con la orientación de la superficie respecto del campo B y que su valor depende del área S de la superficie atravesada, de esta manera cuando las líneas de fuerza atraviesan perpendicularmente una superficie ($\alpha = 0^\circ$) el valor del campo es el máximo, mientras que si las líneas son paralelas a la superficie ($\alpha = 90^\circ$), se tiene un valor nulo. Si el flujo no es uniforme o la superficie no es plana, la expresión matemática tiene la siguiente forma:

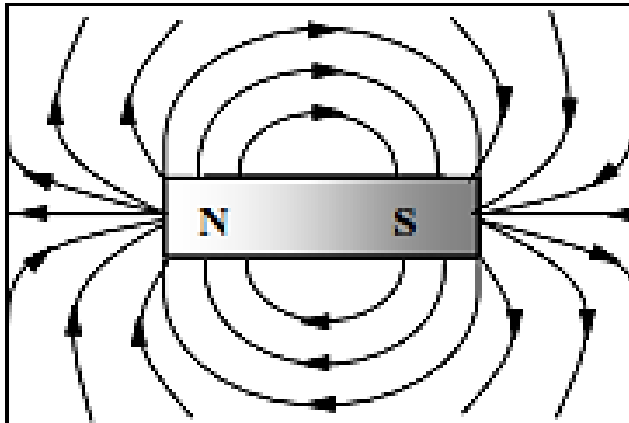
$$\psi(S) = \int_S B \cdot dS$$

En el Sistema Internacional se expresa en *weber* (Wb). Un *weber* es el flujo magnético que al atravesar un circuito de una sola espira produce en ella una fuerza electromotriz de 1 voltio, si se anula dicho flujo en 1 segundo por crecimiento uniforme.

1.2.2. Líneas de campo magnético

Las líneas de campo fueron introducidas por Michael Faraday para representar el campo magnético en forma de líneas de fuerza. La dirección del campo viene indicada por la dirección de las líneas de campo y la magnitud de campo por su densidad. Las líneas de fuerza se separan a partir de un polo y convergen en el otro, formando un circuito cerrado y son perpendiculares a la fuerza magnética sobre una carga móvil, la fuerza magnética es mayor cerca de los polos donde se reúnen (Ver figura 6).

Figura 6. Líneas de campo magnético



Fuente:

http://www.dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/278/3/Capitulo1_Medicion_y_simulacion_de_campos_electromagneticos_de_subestaciones_EERCS.pdf. Consulta: 7 de julio de 2013.

1.2.3. Ley de Gauss para campos magnéticos

En general, el flujo magnético a través de cualquier superficie esta dado por la integral de superficie B sobre la superficie, o:

$$\psi_m = \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (\text{Wb})$$

La densidad de flujo magnético tiene la misma dirección que la intensidad de campo magnético en medios isotrópicos con una magnitud μH .

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} \quad (\text{Wb m}^{-2} \text{ o T})$$

Donde: \mathbf{B} = densidad de flujo magnético, Wb m^{-2}

\vec{H} = campo magnético, A/m

μ = permeabilidad del medio, H/m

μ_0 = permeabilidad del aire o vacío = $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

μ_r = permeabilidad relativa (= 1 para el aire)

Puesto que las líneas de campos magnéticos son espiras cerradas, se concluye que le número de líneas que salen y entran en un volumen sobre una superficie cerrada es cero. Así:

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

1.2.4. Campos magnéticos cambiantes, inducción y ley de Faraday

Una corriente eléctrica estable I produce un campo magnético estable H como esta dado por la ley de Ampere. Pero un campo magnético estable no producirá una corriente eléctrica. Sin embargo, un campo magnético cambiante sí la producirá. Así, un flujo magnético cambiante ψ_m a través de una espira cerrada, como se muestra en la figura 7 produce una fuerza electromotriz (fem) o voltaje V en las terminales del circuito y, esta dada por:

$$V = -\frac{d\psi_m}{dt} \quad (V)$$

En forma más general, se tiene:

$$V = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = - \iint \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (V) \quad \text{Ley de Faraday}$$

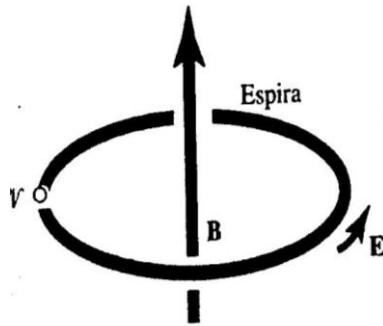
Donde:

$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L}$ = integral de línea de \mathbf{E} alrededor de la espira, V

$\iint \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$ = integral de superficie de $\partial \mathbf{B} / \partial t$ sobre el área A de la espira, V

Así, el campo magnético cambiante produce un campo eléctrico cambiante \mathbf{E} , el cual se suma alrededor de la espira a un voltaje cambiante en las terminales de la espira. Al cerrar las terminales, una corriente que varía con el tiempo fluye en la espira.

Figura 7. **Espira de circuito abierto con voltaje en sus terminales debido a un cambio en el flujo magnético a través de la espira**



Fuente: KRAUSS, John D. Electromagnetismo con aplicaciones. p. 104.

La ley de Faraday establece que la integral de línea del campo eléctrico alrededor de una espira estacionaria es igual a la integral de superficie (negativa) de la razón de cambio de la densidad de flujo magnético B con respecto al tiempo sobre la superficie, integrada sobre el área de la espira.

1.2.5. Acoplamiento e inductancia mutua

La interferencia es el resultado de un acoplamiento de la señal no deseada entre los circuitos. El parámetro de interés es la razón de voltaje generada en el circuito por la razón de cambio de la corriente en otro circuito. Esta razón es la inductancia mutua M , así:

$$M = \frac{V_1}{\frac{dl_2}{dt}} \quad (\text{H})$$

Donde:

V_1 = voltaje inducido en el circuito 1, V

I_2 = corriente en el circuito 2, A

Para la corriente alterna, $I = I_0 e^{j\omega t}$ y la ecuación anterior se convierte en:

$$M = \frac{V_1}{j\omega I_2} \quad y \quad V_1 = j\omega I_2 M$$

O:

$$\frac{V_1}{I_2} = j\omega M = \text{impedancia mutua } (\Omega)$$

1.3. Propagación de ondas electromagnéticas

En general, las ondas son medios de transporte de energía o información. Ejemplos comunes de ondas electromagnéticas son las ondas de radio, las señales de televisión, los haces de radar y los rayos luminosos. Todas las formas de onda de energía electromagnética comparten tres características fundamentales: se desplazan a gran velocidad, adoptan al hacerlo propiedades de ondas e irradian hacia fuera desde una fuente sin la ayuda de ningún vehículo físico discernible.

1.3.1. Estudio general de las ondas

El detallado conocimiento de la propagación de ondas electromagnéticas implica el de las ondas en general. Una onda es una función tanto del espacio como del tiempo. Ocurre movimiento de ondas cuando una perturbación en un punto inicial en el espacio en un instante inicial se relaciona con lo que sucede en otro punto en un instante de tiempo mayor al inicial.

1.3.2. Propagación de ondas en dieléctricos disipativos

Un dieléctrico disipativo es un medio en el que una onda electromagnética pierde potencia al propagarse a causa de una conducción deficiente. En otras palabras, un dieléctrico disipativo es un medio parcialmente conductor.

Los planos se escogen arbitrariamente; para los fines inmediatos, se supone que están definidos por las superficies $z = \text{constante}$, lo que equivale a expresar que las variaciones espaciales de E y B son cero sobre planos $z = \text{constante}$; es de suponer entonces que:

- Los campos no dependen de x ni y ; es decir que, $\partial/\partial x = \partial/\partial y = 0$ para todas las componentes de campo. Si las ondas se propagan en el vacío, se requiere de una suposición adicional.
- Las densidades de carga y corriente son cero en todas las partes de la región; es decir, $\rho_v = J = 0$.

De las ecuaciones de Helmholtz o ecuaciones vectoriales de onda se tiene:

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0$$

Donde:

$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)$$

Donde γ es la constante de propagación (por metro) del medio.

$$\nabla^2 H - \gamma^2 H = 0$$

Donde:

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

De las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left[\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right]^2} - 1 \right]}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left[\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right]^2} + 1 \right]}$$

La ecuación de la onda respecto al tiempo se tiene que es:

$$E_x(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z)$$

En la figura 8 se presenta el diagrama de E en los instantes $t = 0$ y $t = \Delta t$. Salta a la vista que E solo cuenta con la componente x y se desplaza a lo largo de la dirección +z. Habiendo obtenido $E(z, t)$, $H(z, t)$ queda de la siguiente forma:

$$H_y(z, t) = \text{Re}(H_0 e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} a_y)$$

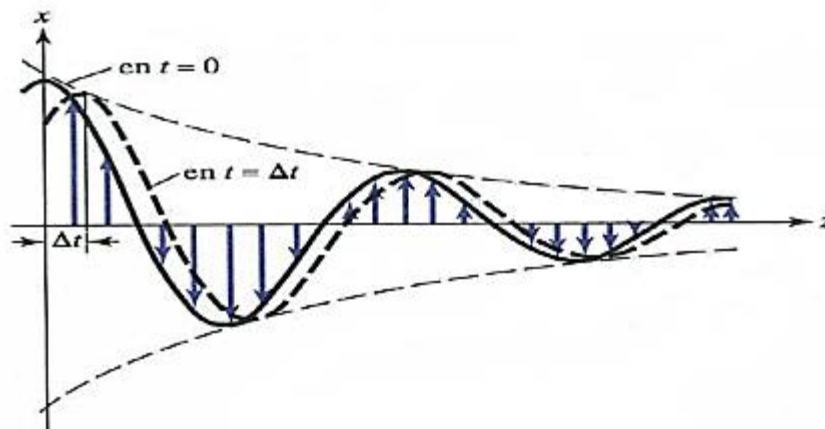
Donde:

$$H_0 = \frac{E_0}{\eta}$$

Y donde η es una cantidad compleja conocida como la impedancia intrínseca (en ohm) del medio.

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}$$

Figura 8. **Campo E con la componente x en desplazamiento a lo largo de la dirección $+z$**



Fuente: SADIKU, Matthew N.O. Elementos de electromagnetismo. p. 420.

De las ecuaciones anteriores se desprende que conforme la onda se propaga a lo largo de la dirección z , su amplitud decrece o atenúa en un factor $e^{-\alpha z}$, motivo por el cual α recibe el nombre de constante de atenuación o factor de atenuación del medio. Esta constante mide el índice espacial de la declinación de la onda en el medio y se enuncia en neper por metro (Np/m) o en decibeles por metro (dB/m).

Vale hacer notar que si $\sigma = 0$, como es el caso tanto de un medio sin pérdidas como del vacío, $\alpha = 0$, de modo que la onda no se atenúa al

propagarse. La cantidad β es una medida del corrimiento de fase por la longitud y se llama constante de fase o número de onda. En términos de β , la longitud de onda λ están dadas por:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$$

1.3.3. Ondas planas en el vacío

En un dieléctrico sin pérdidas, $\sigma \ll \omega\epsilon$. Este es un caso especial de la sección anterior, salvo que:

$$\sigma \approx 0, \quad \epsilon = \epsilon_0\epsilon_r, \quad \mu = \mu_0\mu_r$$

Al sustituir los valores en las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\alpha = 0, \quad \beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$$

$$u = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}, \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$$

Donde $c \approx 3 \times 10^8$ m/s, la velocidad de la luz en el vacío. El hecho de que las ondas electromagnéticas viajen en el vacío a la velocidad de la luz es importante, pues indica que la luz es manifestación de una onda electromagnética. Asimismo:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \cong 377\Omega$$

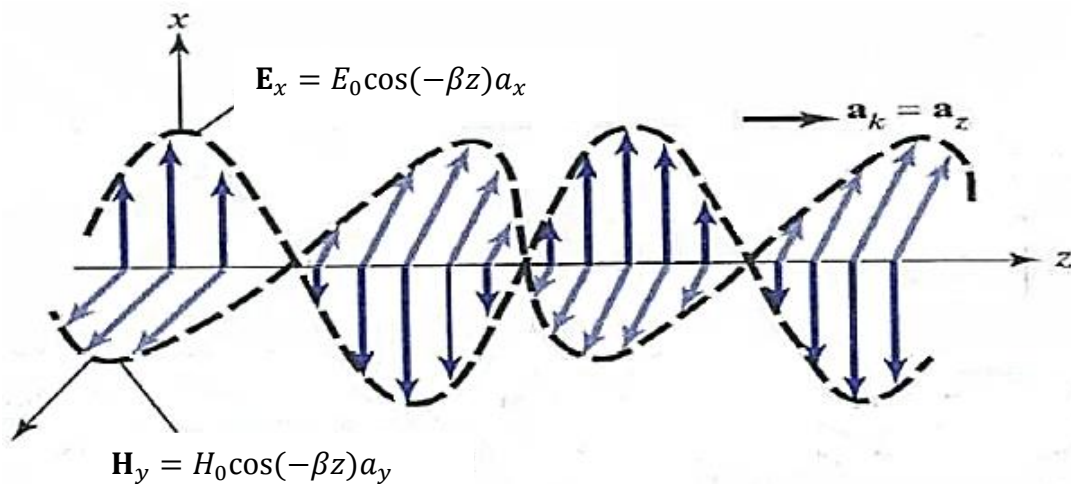
En la figura 9 aparece el diagrama de E y H. En general, los vectores unitarios indican la dirección de propagación de la onda es posible demostrar que:

$$\mathbf{a}_k \times \mathbf{a}_E = \mathbf{a}_H$$

O:

$$\mathbf{a}_k \times \mathbf{a}_H = -\mathbf{a}_E$$

Figura 9. **Diagrama de E y H como funciones de z en t = 0**



Fuente: SADIKU, Matthew N.O. Elementos de electromagnetismo. p. 424.

1.3.4. Ondas planas en buenos conductores

Un conductor perfecto, o buen conductor, es aquel en el que $\sigma \gg \omega\epsilon$, de modo que $\sigma/\omega\epsilon \rightarrow \infty$; es decir:

$$\sigma \approx \infty, \quad \epsilon = \epsilon_0, \quad \mu = \mu_0\mu_r$$

En estas condiciones las ecuaciones vistas anteriormente se convierten en:

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \sqrt{\pi f\mu\sigma}$$

1.3.5. Potencia y vector de Poynting

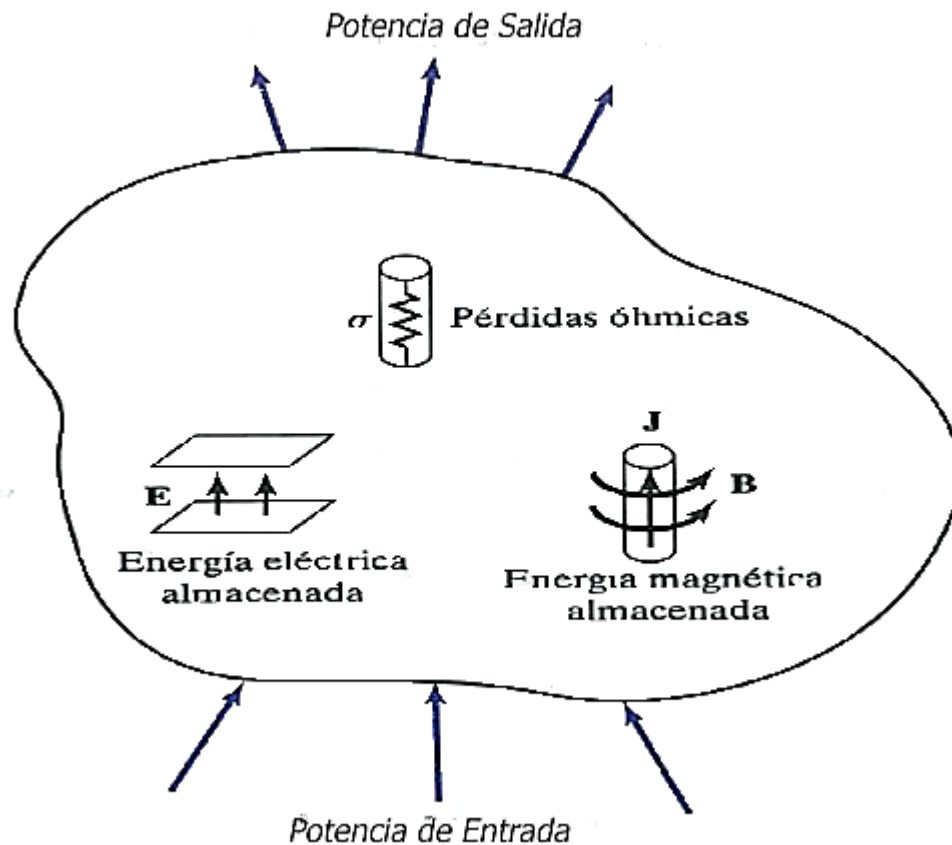
En el teorema de Poynting los términos se identifican con argumentos de la conservación de la energía aplicados a campos electromagnéticos. El primer término del miembro derecho de esta ecuación es la rapidez de decremento de la energía almacenada en los campos eléctricos y magnéticos, y el segundo la potencia disipada a causa de que el medio es un conductor ($\sigma \neq 0$). La cantidad $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ en el miembro izquierdo es el vector de Poynting (el cual se mide en watts por metro cuadrado [W/m^2], es decir:

$$\oint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left[\frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2} \mu H^2 \right] dv - \int_V \sigma E^2 dv$$

$$\mathcal{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

El teorema de Poynting establece que la potencia neta que sale de un volumen dado es igual a la rapidez temporal de decremento de la energía almacenada en v menos las pérdidas de conducción.

Figura 10. **Ilustración del equilibrio de potencia en campos electromagnéticos**



Fuente: SADIKU, Matthew N.O. Elementos de electromagnetismo. p. 437.

2. PARÁMETROS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Los cuatro parámetros básicos de las líneas de transmisión a analizarse a continuación son la resistencia serie, la inductancia serie, la capacitancia en derivación y la conductancia en derivación, así como, los campos eléctricos y magnéticos en las líneas de transmisión.

2.1. Resistencia

La resistencia de cd de un conductor a una temperatura especificada T es:

$$R_{cd,T} = \frac{\rho_T l}{A} \Omega$$

En donde:

ρ_T = resistividad del conductor a la temperatura T

l = longitud del conductor

A = área de la sección transversal del conductor

La resistividad depende del metal del conductor. El conductor recocido es el estándar internacional para medir la resistividad.

La resistencia de los conductores depende de los factores siguientes:

- La disposición en espiral
- Temperatura

- Frecuencia (efecto Piel)
- Magnitud de la corriente; conductores magnéticos

Para los conductores trenzados, las capas alternadas de hilos describen espirales en direcciones opuestas para mantener los hilos unidos. La formación de la espiral hace que los hilos sean 1 o 2 por ciento más largos que la longitud real del conductor. La resistividad de los metales para conductores varía linealmente sobre las condiciones normales de operación, de acuerdo con:

$$\rho_{T_2} = \rho_{T_1} \left(\frac{T_2 + T}{T_1 + T} \right)$$

En donde:

ρ_{T_1} = resistividad a la temperatura T_1 °C.

ρ_{T_2} = resistividad a la temperatura T_2 °C.

T = es una constante de temperatura que depende del material del conductor.

La resistencia de c.a. o resistencia efectiva de un conductor es:

$$R_{ca} = \frac{P_{p\acute{e}rdida}}{|I|^2} \Omega$$

En donde:

$P_{p\acute{e}rdida}$ es la pérdida real de potencia del conductor, en *watts*, e I es la corriente rms en el conductor. Para la CA, la distribución de corriente no es uniforme, conforme aumenta la frecuencia, la corriente en un conductor cilíndrico sólido

tiente a agolparse hacia la superficie del mismo, con menor densidad de corriente en el centro de este.

Este fenómeno se conoce como efecto piel. A las frecuencias de la transmisión de potencia (60 *Hertz*), la resistencia de CA es al menos un pequeño porcentaje más alta que al de cd. Normalmente los fabricantes de conductores proporcionan la resistencia de CD, a 50 y 60 Hertz de los conductores con base en datos de prueba.

2.2. Conductancia

La conductancia explica la pérdida de potencia real entre conductores o entre los conductores y la tierra. Para las líneas aéreas, esta pérdida de potencia se debe a las corrientes de fuga en los aisladores y corona. La corriente de fuga del aislador depende de la cantidad de suciedad, sal y otros contaminantes que se hayan acumulado sobre los aisladores, así como factores meteorológicos, en particular la presencia de humedad. El efecto corona ocurre cuando un valor elevado de la intensidad del campo eléctrico en la superficie de un conductor hace que el aire se ionice eléctricamente y se vuelva conductor.

La pérdida de potencia real debido al efecto corona, llamada pérdida por efecto corona, depende de las condiciones meteorológicas, en particular la lluvia, y de las irregularidades en la superficie del conductor. Las pérdidas debidas a la fuga en el aislado y al efecto corona suelen ser pequeñas en comparación con la pérdida I^2R en el conductor. La conductancia suele despreciarse en los estudios de sistemas de potencia, porque es un componente muy pequeño de la admitancia en derivación.

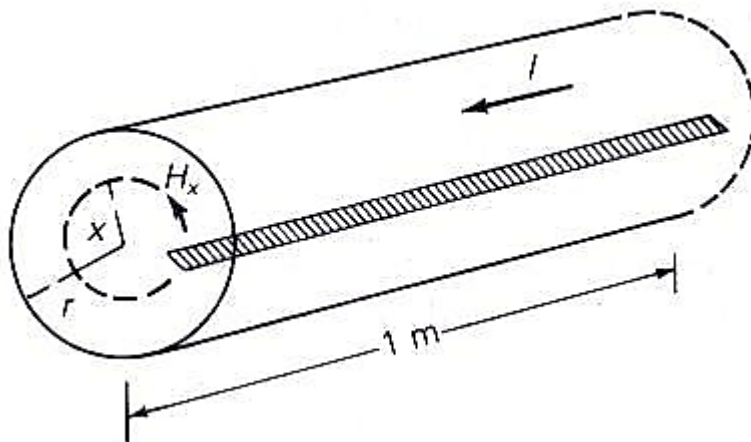
2.3. Inductancia línea monofásica de dos conductores y línea trifásica

La inductancia de un circuito magnético que tiene una permeabilidad constante μ se puede obtener con la determinación de:

- La intensidad del campo magnético, H , a partir de la ley de Ampere
- La densidad de flujo magnético, B ($B = \mu H$)
- Los enlaces de flujo λ
- La inductancia proveniente de los enlaces de flujo por *ampere* ($L = \lambda/I$)

Para el cálculo de la inductancia se calcula la inductancia interna, la externa y la total de un conductor cilíndrico sólido. También se calcula el flujo que enlaza a un conductor en un arreglo de conductores portadores de corriente.

Figura 11. **Campo magnético interno de un conductor cilíndrico sólido**



Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 155.

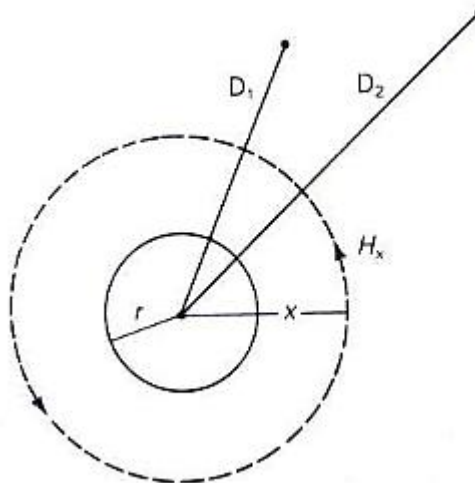
La figura 11 muestra una sección de 1 m de conductor cilíndrico sólido con radio r y que lleva una corriente I . La inductancia interna L_{int} por unidad de longitud del conductor debido al flujo enlazado, es entonces:

$$L_{int} = \frac{\lambda_{int}}{I} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \quad \text{H/m}$$

Con el fin de determinar el flujo magnético en el exterior del conductor se tomará en cuenta la figura 12 seleccionando el círculo de la línea punteada de radio $x > r$ como el contorno cerrado para la ley de Ampere, se tiene que la inductancia externa L_{12} por unidad de longitud debida a los enlaces de flujo entre D_1 y D_2 , es entonces:

$$L_{12} = \frac{\lambda_{12}}{I} = 2 \times 10^{-7} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \quad \text{H/m}$$

Figura 12. **Campo magnético externo de un conductor cilíndrico sólido**



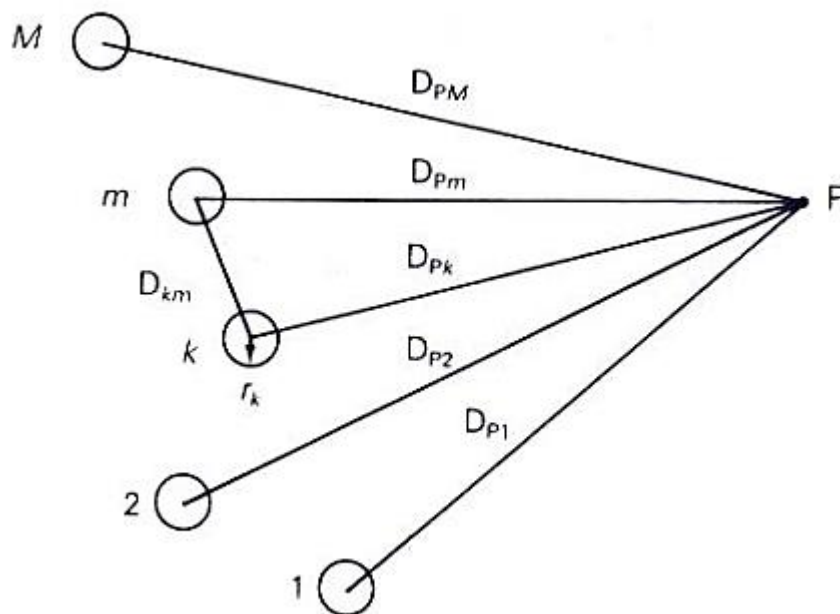
Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 156.

Asimismo, la inductancia total L_p debido tanto al flujo enlazada interno como al externo hasta la distancia D es:

$$L_p = \frac{\lambda_p}{I} = 2 \times 10^{-7} \ln\left(\frac{D}{r'}\right) \quad \text{H/m}$$

Por último, se considera un arreglo de M conductores cilíndricos sólidos que se muestran en la figura 13. Se tomara cada conductor m lleva la corriente I_m saliendo, utilizando la ley de Corrientes de Kirchhoff, esta ley establece que la suma de corrientes individuales es igual a cero.

Figura 13. **Arreglo de M conductores cilíndricos sólidos**



Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 158.

Es decir:

$$I_1 + I_2 + \cdots + I_M = \sum_{m=1}^M I_m = 0$$

El flujo enlazado λ_{kPk} , que enlaza al conductor k hasta el punto P, debido a la corriente I_k , es:

$$\lambda_{kPk} = 2 \times 10^{-7} I_k \ln \left(\frac{D_{Pk}}{r'_k} \right)$$

2.4. Inductancia: conductores compuestos, espaciamiento desigual entre fases, conductores en haz

Un conductor trenzado es un ejemplo de un conductor compuesto. Por sencillez, se supone que, para cada conductor, los subconductores son idénticos y comparten por igual la corriente en ellos. En la figura 14 se muestra una línea monofásica de dos conductores que consta de dos conductores compuestos x y y . El conductor x tiene N subconductores idénticos, cada uno con radio r_x y con corriente (I/N) .

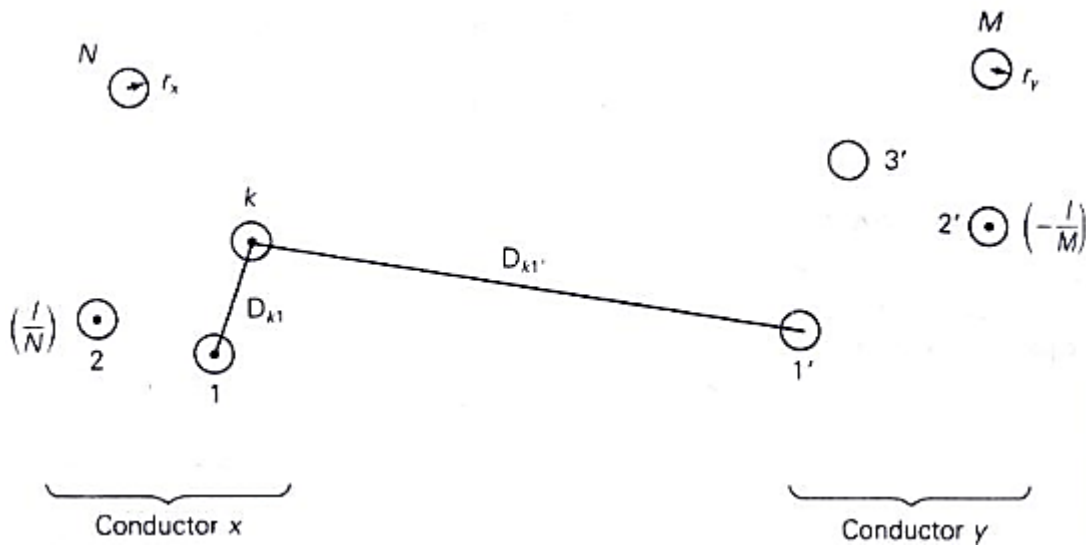
Dado que la suma de todas las corrientes es cero, el flujo total Φ_k que enlaza al subconductor k del conductor x es:

$$\Phi_k = 2 \times 10^{-7} \left[\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \ln \left(\frac{1}{D_{km}} \right) - \frac{I}{M} \sum_{m=1'}^N \ln \left(\frac{1}{D_{km}} \right) \right]$$

El flujo enlazado total del conductor x es:

$$\lambda_x = \sum_{k=1}^N \lambda_k = 2 \times 10^{-7} I \sum_{k=1}^N \left[\frac{1}{N^2} \sum_{m=1}^N \ln \left(\frac{1}{D_{km}} \right) - \frac{1}{NM} \sum_{m=1}^M \ln \left(\frac{1}{D_{km}} \right) \right]$$

Figura 14. **Línea monofásica de dos conductores con conductores compuestos**



Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 162.

La inductancia del conductor x , $L_x = \frac{\lambda_x}{I}$, se puede escribir como:

$$L_x = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D_{xy}}{D_{xx}} \right) \quad \text{H/m por conductor}$$

En donde:

$$D_{xy} = \sqrt[MN]{\prod_{k=1}^N \prod_{m=1}^M D_{km}}$$

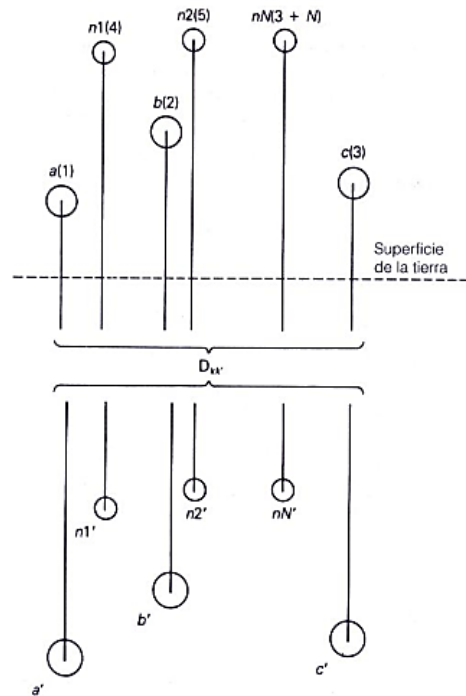
$$D_{xx} = \sqrt[N^2]{\prod_{k=1}^N \prod_{m=1}^N D_{km}}$$

2.5. Impedancia en serie: línea trifásica con conductores neutros y retorno a tierra

Esta línea tiene tres conductores de fase, a, b y c , la línea también tiene N conductores neutros denotados por n_1, n_2, \dots, n_N , todos los conductores neutros están conectados en paralelo y conectados a la tierra a intervalos regulares a lo largo de la línea. Si la corriente de fase no está balanceada, puede haber una corriente de retorno en los conductores neutros conectados a la tierra y en esta la corriente de retorno por la tierra se dispersará debajo de la línea buscando la trayectoria de retorno de impedancia más baja.

En la figura 15 se muestra la configuración de la línea de transmisión trifásica con la tierra reemplazada por conductores de retorno.

Figura 15. **Línea de transmisión trifásica con la tierra reemplazada por conductores de retorno**



Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 170.

Cada conductor de retorno por tierra lleva la negativa de la corriente de su conductor aéreo, tiene un *RMG* denotado por $D_{k'k}$, la distancia $D_{kk'}$, a su conductor aéreo y la resistencia R_k dados por:

$$D_{k'k} = D_{kk} \quad \text{m}$$

$$D_{kk'} = 658,5 \sqrt{\rho/f} \quad \text{m}$$

$$R_k = 9,869 \times 10^{-7} f \quad \Omega/\text{m}$$

En donde ρ es la resistividad de la tierra en ohm-metro y f es la frecuencia en Hertz. En la tabla I se da una lista de las resistividades de la tierra y las

distancias equivalentes de los conductores a 60 Hertz para diversos tipos de tierra. Es práctica común seleccionar $\rho = 100 \Omega\text{m}$ cuando no se dispone de datos reales.

Tabla I. **Resistividades de la tierra y distancias equivalentes de los conductores a 60 Hertz**

Tipo de tierra	Resistividad (Ωm)	D_{kk} (m)
Agua de mar	0,01 – 1,0	8,50 – 85,0
Terreno Pantanoso	10 – 100	269 – 850
Tierra promedio huemeda	100	850
Tierra seca	1000	2690
Pizarra pura	10^7	269000
Arenisca	10^9	2690000

Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 171.

Observe que el RMG de cada conductor de retorno a tierra, $D_{kk'}$, es el mismo que el RMG de su conductor aéreo correspondiente. También, todos los conductores de retorno a tierra tienen la misma distancia $D_{kk'}$ de sus conductores aéreos y tienen la misma resistencia.

2.6. Campo eléctrico y tensión

Se puede determinar la capacitancia entre los conductores en un medio con permitividad constante ϵ mediante la determinación de lo siguiente:

- La intensidad del campo eléctrico, E , a partir de la ley de Gauss

- La tensión entre los conductores
- La capacitancia a partir de la carga por unidad de volt ($C = q/V$)

Como un paso hacia el cálculo de las capacitancias de las configuraciones generales de los conductores, en primer lugar se calculará el campo eléctrico de un conductor cilíndrico sólido uniformemente cargado, y la tensión entre dos puntos afuera de ese conductor. También se calculará la tensión entre dos conductores en un arreglo de conductores cargados.

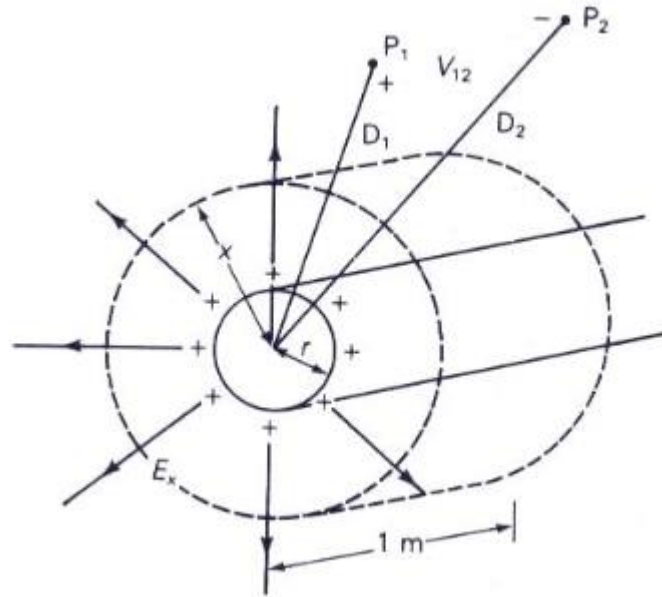
La ley de Gauss afirma que el flujo eléctrico total que sale de una superficie cerrada es igual a la carga total que esta en el volumen cerrado por esa superficie. Es decir, la componente normal de la intensidad de flujo eléctrico integrada sobre un superficie cerrada es igual a la carga encerrada.

$$\oiint \vec{D} \cdot d\vec{S} = \oiint \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{S} = Q_{encerrada}$$

En donde \vec{D} denota la componente normal de la densidad de flujo eléctrico, \vec{E} denota la componente normal de la intensidad de campo eléctrico y ds denota el área de la superficie diferencial. Por la ley de Gauss, la carga eléctrica es una fuente de campos eléctricos. Las líneas del campo eléctrico se originan en las cargas positivas y terminan en las negativas.

En la figura 16 se muestra un conductor cilíndrico sólido con radio r y con carga q *coulombs* por metro, uniformemente distribuida sobre la superfiie del conductor. Por sencillez, suponga que el conductor es: primero, suficientemente largo, de modo que los efectos en los extremos son despreciables; y segundo, un conductor perfecto (es decir, cero resistividad, $\rho = 0$).

Figura 16. **Conductor cilíndrico sólido de conducción perfecta y con distribución uniforme de carga**



Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 176.

Dentro de un conductor perfecto, la ley de Ohm da $E_{int} = \rho J = 0$. Es decir, el campo eléctrico interno es cero. Para determinar el campo eléctrico afuera del conductor, se selecciona el cilindro con radio $x > r$ y con una longitud de 1 metro, mostrado en la figura 16, como la superficie cerrada para la ley de Gauss. Debido a la distribución uniforme de carga, la intensidad del campo eléctrico es constante en el cilindro.

$$E_x = \frac{q}{2\pi\epsilon x} \quad \text{V/m}$$

En donde, para un conductor en el espacio libre, $\epsilon = \epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m. En la figura 16, también se muestra una gráfica de las líneas de

campo eléctrico. La dirección de las líneas del campo eléctrico, denotada por las flechas es de las cargas positivas, en donde se origina el campo eléctrico, hacia las cargas negativas, las cuales, en este caso, están en el infinito. Si la carga sobre la superficie del conductor fuera negativa, entonces se invertiría la dirección de las líneas del campo.

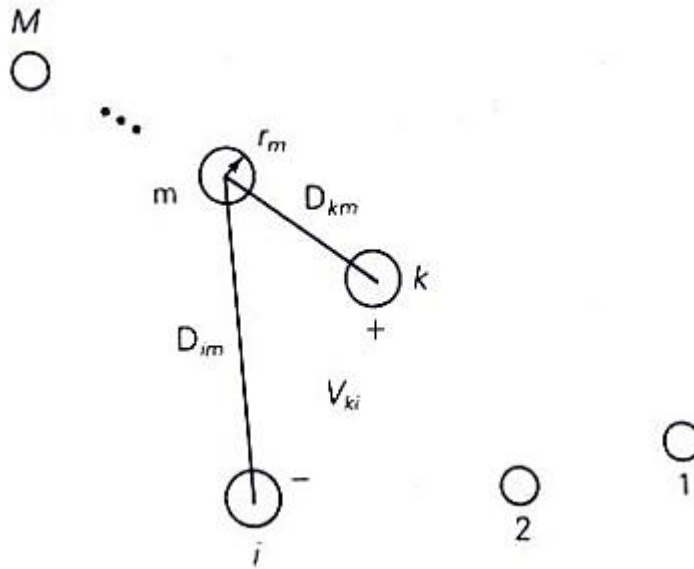
La diferencia de potencial entre dos cilindros concéntricos a las distancias D_1 y D_2 del centro del conductor es:

$$V_{12} = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2\pi\epsilon x} dx = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \quad \text{volts}$$

La ecuación anterior da la tensión V_{12} entre los dos puntos, P_1 y P_2 , a las distancias D_1 y D_2 del centro del conductor como se muestra en la figura 16. También, según la notación acordada V_{12} es la tensión en P_1 con respecto a P_2 . Para la aplicación de la ecuación anterior para un arreglo de M conductores cilíndricos sólidos como se muestra en la figura 17, usando la superposición, la tensión V_{ki} entre los conductores k e i debida a todas las cargas es:

$$V_{ki} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{m=1}^M q_m \ln\left(\frac{D_{im}}{D_{km}}\right) \quad \text{volts}$$

Figura 17. Arreglo de M conductores cilíndricos sólidos



Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 177.

2.7. Capacitancia: línea monofásica de dos conductores y línea trifásica de tres conductores con espaciamiento igual entre fases

Se considera la línea monofásica de dos conductores que se muestra en la figura 18. Al suponer que los conductores están energizados por un fuente de tensión tal que el conductor x tiene una carga uniforme q C/m y, suponiendo la conservación de la carga, el conductor y tiene una cantidad igual de carga negativa. Dando la ecuación siguiente:

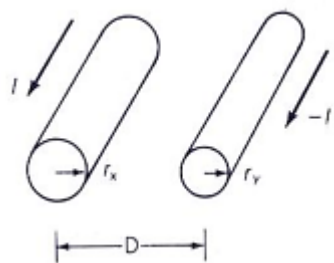
$$V_{xy} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q \ln \frac{D_{yx}}{D_{xx}} - q \ln \frac{D_{yy}}{D_{yx}} \right]$$

$$V_{xy} = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{yx}D_{xy}}{D_{xx}D_{yy}}$$

Para un tramo de 1 metro de línea la capacitancia entre los conductores es:

$$C_{xy} = \frac{q}{V_{xy}} = \pi\epsilon / \ln \left(\frac{D}{\sqrt{r_x r_y}} \right) \quad \frac{\text{F}}{\text{m}} \text{ línea a línea}$$

Figura 18. **Línea monofásica de dos conductores**

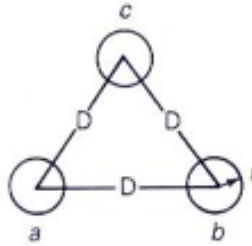


Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 160.

A continuación considerar la línea trifásica con espaciamiento igual entre fases mostrado en la figura 19. En este caso, se desprecia el efecto de los conductores a tierra y neutro. La ecuación para la tensión entre los conductores *a* y *b* es:

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D_{ba}}{D_{aa}} + q_b \ln \frac{D_{bb}}{D_{ab}} + q_c \ln \frac{D_{bc}}{D_{ac}} \right]$$

Figura 19. **Línea trifásica de tres conductores con igual espaciamiento de fases**



Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 160.

Utilizando $D_{aa} = D_{bb} = r$ y $D_{ab} = D_{bc} = D_{ca} = D_{cb} = D$, quedando como:

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{r}{D} + q_c \ln \frac{D}{D} \right]$$

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{r}{D} \right] \quad \text{volts}$$

Notar que el tercer término de la ecuación anterior es cero porque los conductores a y b están equidistantes del conductor c . Por tanto, los conductores a y b se encuentran sobre un cilindro de potencial constante para el campo eléctrico debido a que q_c .

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[q_a \ln \frac{D}{r} + q_c \ln \frac{r}{D} \right] \quad \text{volts}$$

Recordar que para las tensiones balanceadas en secuencia positiva se tienen las siguientes ecuaciones:

$$V_{ab} = \sqrt{3}V_{an}\angle + 30^\circ$$

$$V_{ac} = -V_{ca} = \sqrt{3}V_{an}\angle - 30^\circ$$

Sumando la ecuaciones anteriores se tiene:

$$V_{ab} + V_{ac} = 3V_{an}$$

La capacitancia al neutro por el tramo de línea es:

$$C_{an} = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad \text{F/m línea a neutro}$$

2.8. Admitancias en derivación: líneas con conductores neutros y retorno por tierra

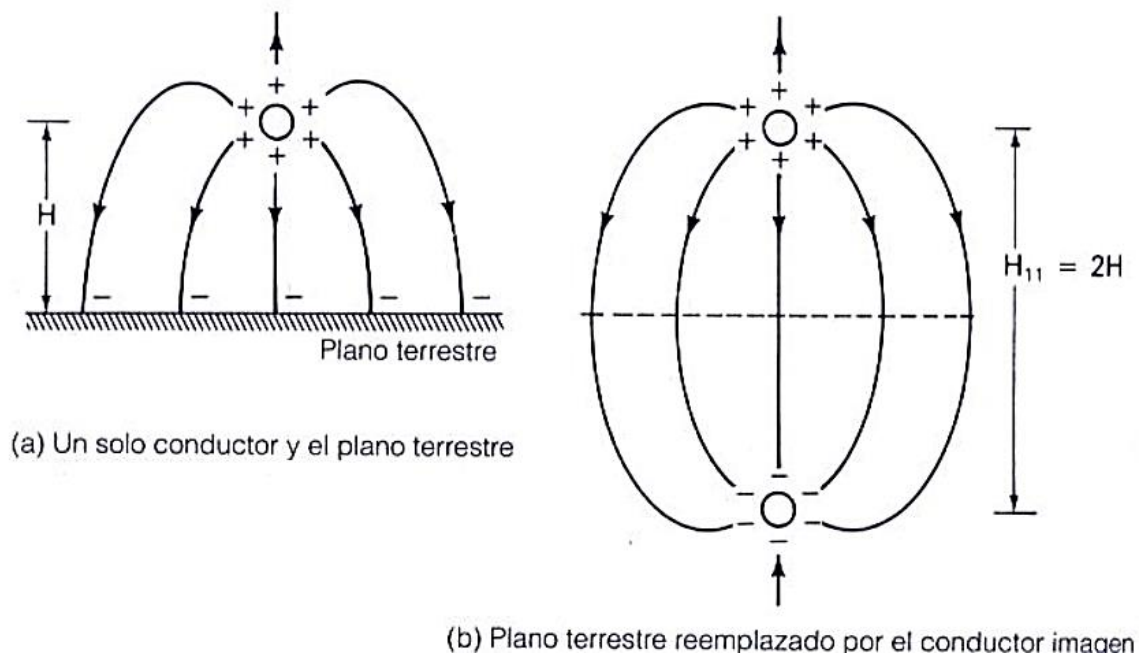
En esta sección se desarrollan las ecuaciones adecuadas para realizar el cálculo de las admitancias en derivación por la línea trifásica aérea de la figura 15. Se considera una aproximación de la superficie terrestre como un plano horizontal perfectamente conductor, aún cuando la tierra debajo de la línea puede ser un terreno irregular y tener las resistividades como se indica en la tabla I.

Se toma en consideración el efecto del plano terrestre por el método de las imágenes. Considerar un solo conductor con distribución uniforme de carga y a una altura H arriba de un plano terrestre perfectamente conductor, como se

muestra en la figura 20 (a). Cuando el conductor tiene una carga positiva, una cantidad igual de carga negativa se induce en la tierra. Las líneas del campo eléctrico se originarán en las cargas positivas en el conductor y terminarán en las cargas negativas sobre la tierra.

Las líneas del campo eléctrico se originarán en las cargas positivas en el conductor y terminarán en las cargas negativas sobre la tierra. Asimismo, las líneas del campo eléctrico son perpendiculares a las superficies del conductor y de la tierra.

Figura 20. **Método de las imágenes**



Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 184.

Ahora reemplazar la tierra por el conductor imagen que se muestra en la figura 20 (b), el cual tiene el mismo radio que el conductor original, se encuentra

directamente debajo de este con una separación entre conductores $H_{11} = 2H$ y tiene una cantidad igual de carga negativa.

El campo eléctrico de la línea punteada que representa la ubicación del plano terrestre eliminado de la figura 20 (b) es idéntico al campo eléctrico arriba de ese plano terrestre en la figura 20 (a). Por lo tanto, la tensión entre dos puntos cualesquiera arriba de la tierra es la misma en ambas figuras.

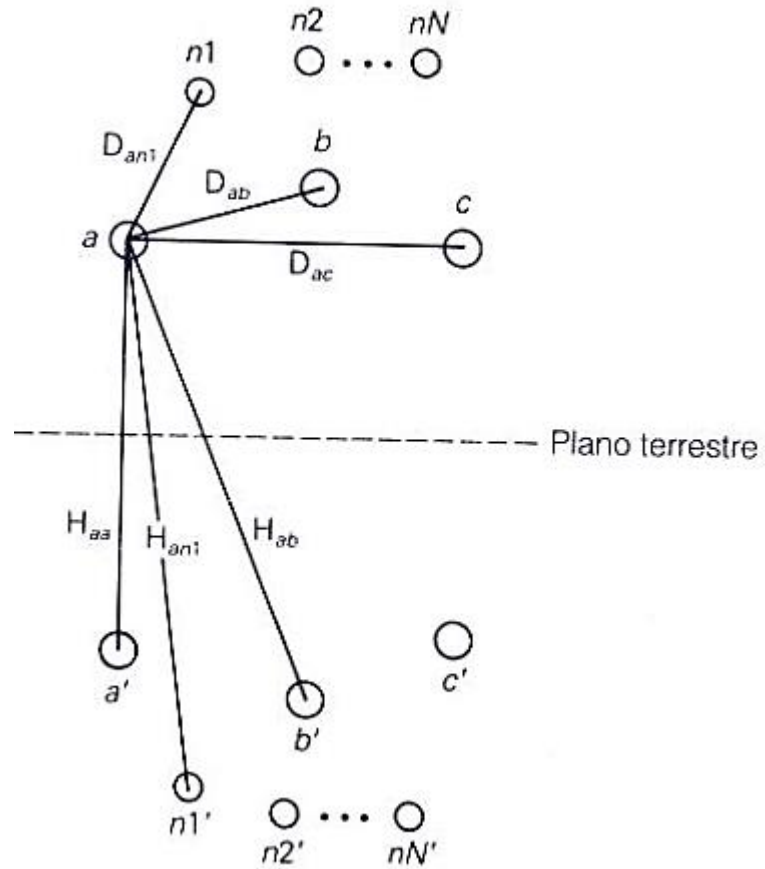
Para la línea trifásica con N conductores neutros, como se muestra en la figura 21, el plano terrestre perfectamente conductor se reemplaza por un conductor imagen separado para cada conductor aéreo. Los conductores aéreos $a, b, c, n1, n2, \dots, nN$ llevan las cargas $q_a, q_b, q_c, q_{n1}, \dots, q_{nN}$ y los conductores imagen $a', b', c', n1', \dots, nN'$ con el fin de determinar la tensión $V_{kk'}$, entre cualquier conductor k y su conductor imagen k' .

$$V_{kk'} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\sum_{m=a}^{nN} q_m \ln \frac{H_{km}}{D_{km}} - \sum_{m=a}^{nN} q_m \ln \frac{D_{km}}{H_{km}} \right]$$

$$V_{kk'} = \frac{2}{2\pi\epsilon} \sum_{m=a}^{nN} q_m \ln \frac{H_{km}}{D_{km}}$$

En donde $D_{kk} = r_k$ y D_{kk} es la distancia entre los conductores aéreos k y m . H_{km} es la distancia entre el conductor aéreo k y el conductor imagen m . Por simetría, la tensión V_{kn} entre el conductor k y la tierra es la mitad de $V_{kk'}$.

Figura 21. Línea trifásica con conductores neutros y con el plano terrestre reemplazado por conductores imagen



Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 184.

2.9. Intensidad de campo eléctrico en las superficies de los conductores y al nivel del suelo

Cuando la intensidad del campo eléctrico en la superficie de un conductor sobrepasa la rigidez dieléctrica del aire se tiene una descarga de corriente. Este fenómeno, llamado efecto corona, causa pérdidas adicionales en la línea (pérdida por efecto corona), interferencia en las comunicaciones y ruido audible. Aún cuando la rigidez dieléctrica depende de muchos factores, un valor aproximado es el de 30 kV/cm en un campo eléctrico uniforme, para el aire seco a la presión atmosférica. La presencia de gotitas de agua o de lluvia puede disminuir este valor de manera significativa.

Para controlar efecto corona, las líneas de transmisión suelen diseñarse con el fin de mantener los valores calculados de la intensidad del campo eléctrico en la superficie del conductor por debajo de 20 kV_{rms}/cm. Cuando se determinan las capacitancias de las líneas y se conocen las tensiones en los conductores, se pueden calcular las cargas en estos a partir de las ecuaciones vistas en la sección 2.8 para una línea trifásica.

Despreciando los campos eléctricos debido a las cargas sobre los otros conductores de fase y los alambres de neutros, la intensidad del campo eléctrico en la superficie de uno de los conductores de fase es:

$$E_r = \frac{q}{2\pi\epsilon r} \quad \text{V/m}$$

Donde:

r es el radio exterior del conductor.

Para conductores en haz, con N_b conductores por haz y con la carga de q C/m por fase, la carga por conductor es q/N_b .

$$E_{rprom} = \frac{q/N_b}{2\pi\epsilon r} \quad \text{V/m}$$

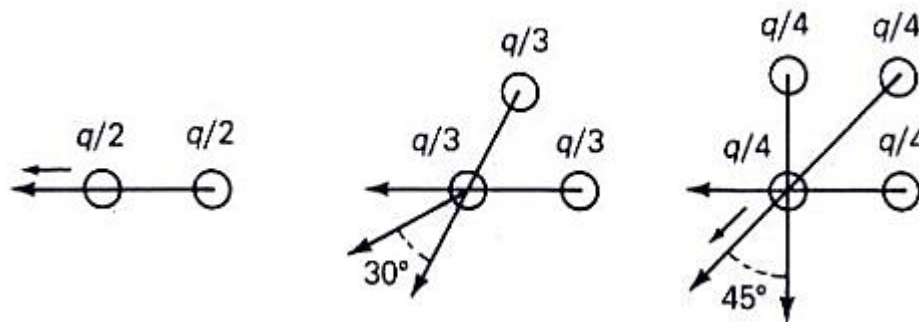
La ecuación anterior representa un valor promedio por un conductor por separado en un haz. La intensidad máxima del campo eléctrico en la superficie de uno de los conductores, debida a todas las cargas en un haz y obtenida por la adición vectorial de los campos eléctricos (como se muestra en la figura 22), es como sigue:

Haz de dos conductores ($N_b = 2$):

$$E_{rmax} = \frac{q/2}{2\pi\epsilon r} + \frac{q/2}{2\pi\epsilon d} = \frac{q/2}{2\pi\epsilon r} \left(1 + \frac{r}{d}\right)$$

$$E_{rmax} = E_{rprom} \left(1 + \frac{r}{d}\right)$$

Figura 22. **Adición vectorial de los campos eléctricos en la superficie de uno de los conductores en un haz**



Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 184.

Aún cuando la intensidad del campo eléctrico al nivel del suelo es mucho menor que en la superficie de los conductores, en donde se presenta el efecto corona, todavía se tienen efectos de acoplamiento capacitivo. Las alturas de las líneas de transmisión se diseñan para mantener las corrientes de descarga por debajo de los niveles prescritos, para cualquier equipo que pueda encontrarse sobre el derecho de paso. En la tabla II se muestran ejemplos de intensidad máxima del campo eléctrico al nivel del suelo.

Tabla II. **Ejemplos de intensidad máxima del campo eléctrico al nivel del suelo contra la tensión en la línea de transmisión**

Tensión en la línea (kV_{rms})	Intensidad máxima del campo eléctrico al nivel del suelo (kV_{rms}/m)
23 (1 ϕ)	0,01 – 0,025
23 (3 ϕ)	0,01 – 0,05
115	0,1 – 0,2
345	2,3 – 5,0
345 (circuito doble)	5,6
500	8,0
765	10,0

Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. p. 190.

3. RADIACIÓN

La frecuencia y la longitud de onda son las magnitudes más importantes que caracterizan a un campo electromagnético debido al efecto que estas tiene sobre el organismo de las personas. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las formas de energía radiante. La radiación es una forma de energía liberada que puede ser de diversos orígenes.

3.1. Radiación ionizante

Son aquellas en las que partículas que se desplazan son iones. Un ion se define como un átomo que ha perdido uno o más de sus electrones. La radiación ionizante engloba el espectro electromagnético más perjudicial para la salud, tales como: rayos X, rayo gamma, partículas alfa, partículas beta y neutrones, es decir, energía nuclear.

3.2. Radiación no ionizante

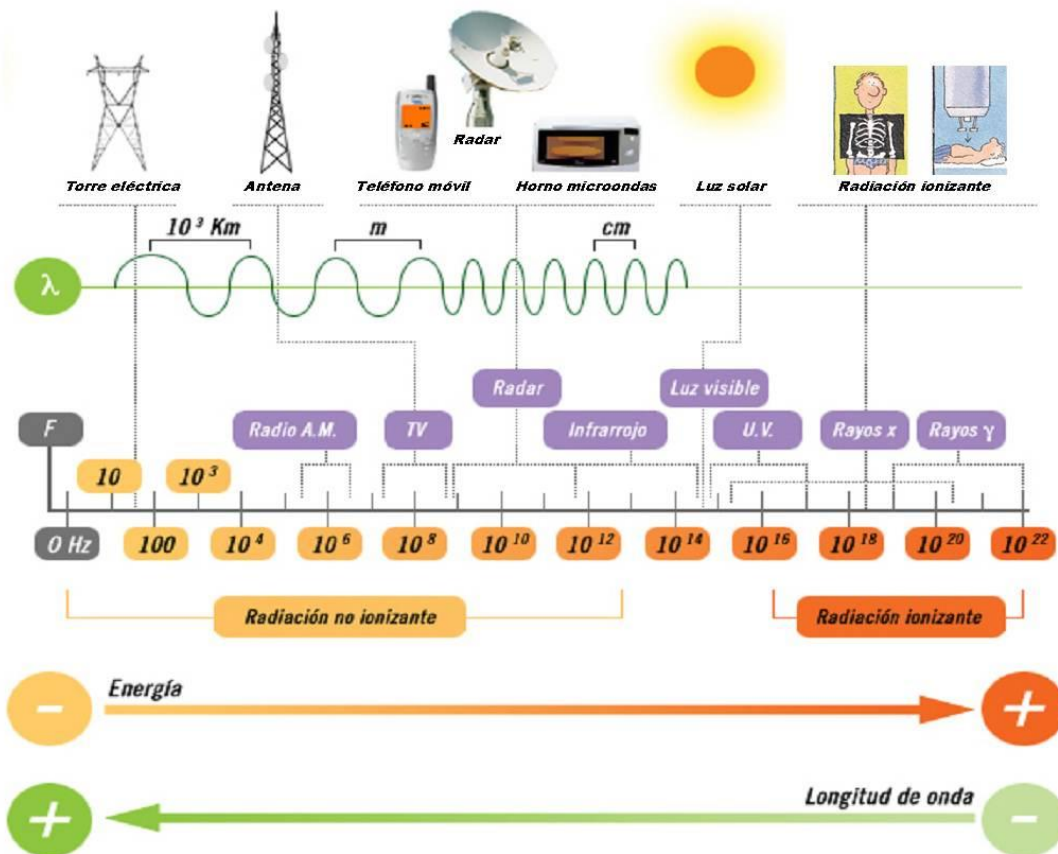
Son aquellas en las que no intervienen iones, las radiaciones están compuestas de fotones sin energía suficiente para romper los enlaces moleculares. Son ejemplos: la radiación ultravioleta, radiación visible, radiación infrarroja, microondas y radiofrecuencia. Las radiaciones no ionizantes, aún cuando sean de alta intensidad, no pueden causar ionización en un sistema biológico.

Sin embargo, se ha comprobado que esas radiaciones producen otros efectos biológicos como por ejemplo: el calentamiento del tejido, alteración de las reacciones neurológica.

3.1.1. Frecuencias típicas de fuentes de radiación no ionizante (RNI) generadas por el hombre en aplicaciones industriales, telecomunicación y transporte de energía

- Fuentes de campos electromagnéticos estáticos (0 Hertz), dentro de estos campos estan: trenes de levitación magnética, sistemas de resonancia magnética para diagnóstico médico o sistemas electrolíticos de aplicación industrial – experimental.
- De campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas e intermedias (ELF $0 \text{ Hz} < f \leq 300 \text{ Hz}$; IF: $300 \text{ Hz} < f \leq 10 \text{ MHz}$, respectivamente): trenes eléctricos (16.66 – 60 Hz y sus armónicos), todo sistema relacionado con la generación, transporte o utilización de la energía eléctrica (50 o 60 Hz), detectores antirrobo, monitores de video y televisión (3 – 30 kHz), radio AM (30 kHz – 3 MHz), cocinas y hornos de inducción (300 kHz – 3 MHz) y equipos de diatermia de (3 – 30 MHz).
- De radiofrecuencias y microondas (RF/ MW: $10 \text{ MHz} < f \leq 300 \text{ GHz}$) son: Radio FM (30 – 300 MHz), teléfonos móviles y las antenas de sus estaciones bases, antenas emisoras de radio y televisión, hornos de microondas, monitores de video, equipos de diatermia (0.3 – 3 GHz), radares y sistemas de comunicación por microondas (3 – 30 GHz).

Figura 23. Espectro electromagnético



Fuente: http://www.rinconeducativo.org/radiacio/espectro_ok.jpg. Consulta: 13 de octubre de 2013.

3.3. Radiación no ionizante y sus efectos en la salud

El daño que causa la radiación en los órganos y tejidos depende de la dosis recibida, o dosis absorbida, que se expresa en una unidad llamada gray (Gy). El daño que puede producir una dosis absorbida depende del tipo de radiación y de la sensibilidad de los diferentes órganos y tejidos.

Más allá de ciertos umbrales, la radiación puede afectar el funcionamiento de órganos y tejidos, y producir efectos agudos tales como enrojecimiento de la piel, caída del cabello, quemaduras por radiación o síndrome de irradiación aguda. Estos efectos son más intensos con dosis más altas y mayores tasas de dosis. Por ejemplo, la dosis liminar para el síndrome de irradiación aguda es de aproximadamente 1 *sieverts* (1,000 milis *sieverts*).

Si la dosis es baja o se recibe a lo largo de un periodo amplio, hay más probabilidades de que las células dañadas se reparen con éxito. Aun así, pueden producirse efectos a largo plazo si el daño celular es reparado, pero incorpora errores, transformando una célula irradiada que todavía conserva su capacidad de división. Esa transformación puede producir cáncer pasado los años o incluso decenios.

No siempre se producen efectos de este tipo, pero la probabilidad de que ocurran es proporcional a la dosis de radiación. El riesgo es mayor para los niños y adolescentes, ya que son mucho más sensibles que los adultos a la exposición a la radiación. Los estudios epidemiológicos de poblaciones expuestas a la radiación (sobrevivientes de la bomba atómica o pacientes sometidos a radioterapia) muestran un aumento significativo del riesgo de cáncer con dosis superiores a 100 milis *sieverts*.

La radiación ionizante puede producir daños cerebrales en el feto tras la exposición prenatal aguda a dosis superiores a 100 milis *sieverts* entre las 8 y las 15 semanas de gestación y a 200 milis *sieverts* entre las semanas 16 y 25. Los estudios en humanos no han demostrado riesgo para el desarrollo del cerebro fetal con la exposición a la radiación antes de la semana 8 o después de la semana 25.

Los estudios epidemiológicos indican que el riesgo de cáncer tras la exposición fetal a la radiación es similar al riesgo tras la exposición en la primera infancia.

Los límites establecidos por la International Commission On Non – Ionizing Radition Protection (ICNIRP), avalados por la Organización Mundial de la Salud, presentan niveles de referencia a partir de las restricciones básicas mediante el uso de modelos matemáticos y por extrapolación de los resultados de las investigaciones de laboratorio en frecuencias específicas. A continuación se presentan los valores de referencia para exposición ocupacional y exposición poblacional en las tablas III y IV respectivamente.

Tabla III. **Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)**

Rango de frecuencias (MHz)	Intensidad de campo eléctrico (Vm^{-1})	Intensidad de campo magnético (Am^{-1})	Densidad de flujo magnético (T)	Densidad de potencia (Wm^{-2})
Hasta 1 Hz	–	$1,63 \times 10^5$	2×10^5	–
1 – 8 Hz	20 000	$1,63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	–
8 – 25 Hz	20 000	$2 \times 10^4 / f$	$2,5 \times 10^4 / f$	–
0,025 – 0, 82 kHz	$500 / f$	$20 / f$	$25 / f$	–
0,82 – 65 kHz	610	24,4	30,7	–
0,065 – 1 MHz	610	$1,6 / f$	$2 / f$	–
1 – 10 MHz	$610 / f$	$1,6 / f$	$2 / f$	–
10 – 400 MHz	61	0,16	0,2	10
400 – 2000 MHz	$3f^{0,5}$	$0,008f^{0,5}$	$0,01 f^{0,5}$	$f / 40$
2 - 300 GHz	137	0,36	0,45	50

Fuente: <http://www.icnirp.de/documents/emfgdlesp.pdf>. Consulta 24 octubre de 2013.

Tabla IV. Niveles de referencia para exposición poblacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)

Rango de frecuencias	Intensidad de campo eléctrico (Vm ⁻¹)	Intensidad de campo magnético (Am ⁻¹)	Densidad de flujo magnético (T)	Densidad de potencia (Wm ⁻²)
Hasta 1 Hz	–	3,2 x 10 ⁴	4 x 10 ⁴	–
1 – 8 Hz	10 000	3,2 x 10 ⁴ / f ²	4 x 10 ⁴ / f ²	–
8 – 25 Hz	10 000	4000/ f	5000/ f	–
0,025 – 0,8 kHz	250 / f	4/ f	5/ f	–
0,8 – 3 kHz	250 / f	5	6,25	–
3 – 150 kHz	87	5	6,25	–
0,15– 1 MHz	87	0,73/ f	0,92 / f	–
1 – 10 MHz	87/ f ^{0,5}	0,73/ f	0,92/ f	–
10 – 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 – 2000 MHz	1,375 ^{0,5}	0,0037 ^{0,5}	0,0046 ^{0,5}	f/ 200
2 - 300 GHz	61	0,16	0,20	10

Fuente: <http://www.icnirp.de/documents/emfgdlesp.pdf>. Consulta 24 octubre de 2013.

Para el caso de Guatemala es utilizada una frecuencia de 60 Hertz los valores de referencia tanto para exposición poblacional y ocupacional quedan descritos en la tabla V.

Tabla V. **Niveles de referencia a 60 Hertz**

Tipo de exposición	Intensidad de campo eléctrico (Vm^{-1})	Intensidad de campo magnético (Am^{-1})
Poblacional	4166,6667	66,6667
Ocupacional	8333,3333	333,333

Fuente: elaboración propia.

Para valores medidos en el campo se toman en consideración si son medidos a una altura de 1 metro sobre el nivel del suelo y considerando diferentes distancias transversales respecto a la línea de transmisión.

4. MODELACIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

La modelación y simulación de campos electromagnéticos permiten tener bases teóricas y datos aproximados para establecer la intensidad tanto del campo eléctrico, como también, el campo magnético, la modelación se regirá con análisis matemático y geométrico debido a la dependencia de la estructura de las líneas de transmisión.

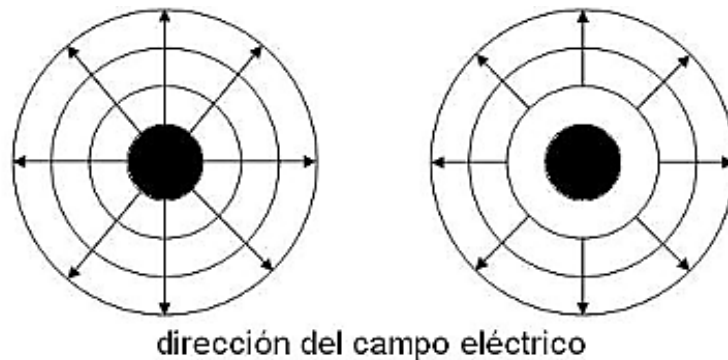
4.1. Método de las imágenes

El método de las imágenes consiste en sustituir superficies, límites o separación entre dos dieléctricos por cargas ficticias o cargas de imagen que den resultados equivalentes.

El campo creado por un eje con carga positiva (+q), forman líneas de fuerza radiales y las superficies equipotenciales, cilindros concéntricos. Coincidiendo con una de tales superficies equipotenciales se puede disponer un tubo metálico muy delgado sin que el campo resulte modificado.

Incluso puede suprimirse el eje cargado y en su lugar disponer la carga (+q) distribuida uniformemente sobre la superficie exterior del tubo. Por tanto, un tubo o un conductor cilíndrico muy largo se comportan igual que un eje cargado, ver figura 24.

Figura 24. Campos equivalentes debido a un eje cargado y a un conductor cilíndrico con igual carga

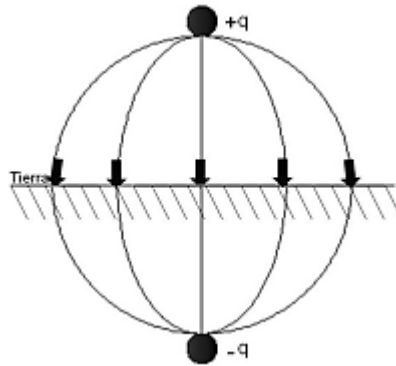


Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1084>. Consulta: 24 de septiembre de 2013.

Si un campo eléctrico cualquiera se introduce una superficie metálica conductora, infinitamente delgada, coincidiendo exactamente con una superficie equipotencial, el campo no se modifica, pues las líneas del campo continúan siendo normales a la superficie metálica que a un punto de igual potencial.

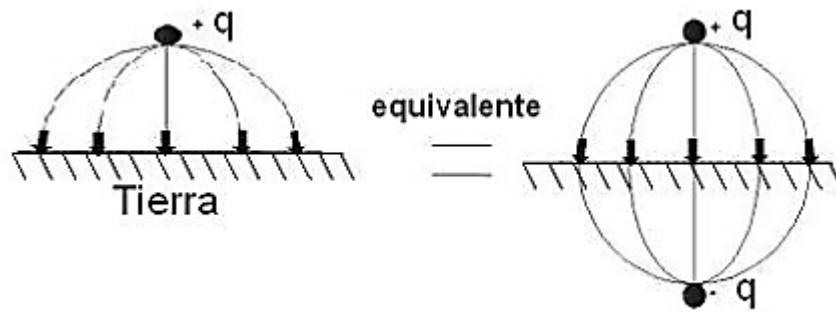
Tal superficie separa ahora el campo en dos partes que pasan a ser independientes en el sentido de poder suprimirse una de ellas, subsistiendo la otra parte en su forma original. En sistemas de transmisión, la tierra afecta la forma del campo eléctrico bajo la línea; la tierra se considera una superficie equipotencial dado que asume su efecto considerando cargas imágenes, figura 25. Estas cargas se ubican con la misma distancia que se tiene desde el conductor real a tierra, pero partiendo de tierra a su interior, también están dadas con signo opuesto del conductor real, figura 26.

Figura 25. **Campo debido a dos cargas iguales de signo opuesto**



Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1084>. Consulta: 24 de septiembre de 2013.

Figura 26. **Eliminación de la tierra**



Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1084>. Consulta: 24 de septiembre de 2013.

4.2. Parámetros necesarios para la determinación de los campos electromagnéticos

Para la determinación de los campos electromagnéticos se necesitan los siguientes parámetros de la línea de transmisión, en este caso para una línea de 230 kVA se utilizará la estructura 1 indicada en el anexo 1, tomando en consideración que para el estudio a realizar se tomará el promedio de la longitud del vano para encontrar el punto más bajo.

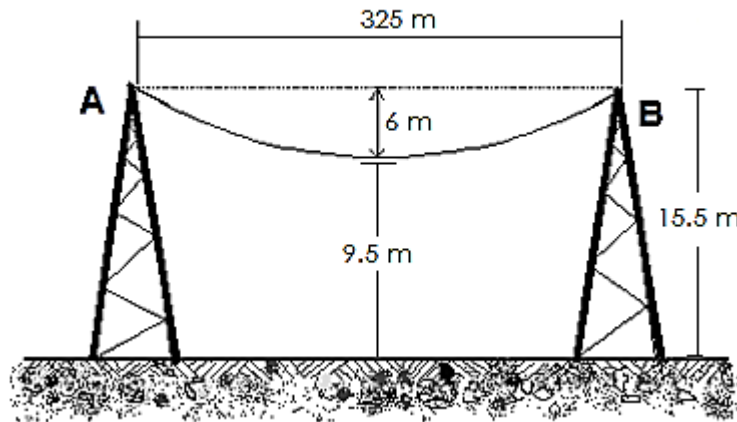
En la tabla VI se muestran las distancias de los vanos y la altura mínima del conductor más bajo debido a la catenaria. La figura 27 representa la última fase de la torre de transmisión y el punto más bajo a la cual la línea cae debido a la catenaria.

Tabla VI. **Vanos**

Longitud promedio	20,3723 km
Vano promedio	325 m
Altura mínima del conductor más bajo	9,5 m

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Altura mínima del conductor más bajo en una torre de transmisión**



Fuente: elaboración propia, con programa Microstation 2010.

Para conocer la distancia mínima de seguridad vertical de conductores de líneas aéreas, las Normas Técnicas de Diseño y Operación del Servicio de Transporte de energía eléctrica (NTDOST) hacen referencia a utilizar la tabla No. 2 de las Normas técnicas de diseño y operación de las instalaciones de distribución (NTDOID).

Esta tabla tiene como recomendación una distancia de seguridad de 5,6 metros + 0,01 metros por cada kV arriba de 22 kV, esta tensión es dada de fase a tierra, por lo tanto, para conocer la distancia mínima de seguridad para el nivel de tensión según el título II, Criterios generales de diseño y seguridad, capítulo 1, Líneas aéreas, artículo 18,2 distancias de seguridad verticales de conductores sobre el nivel del suelo, carreteras, vías férreas y superficies con agua, en el inciso B, numeral 1, para tensiones mayores de 50 kV, deben ser basadas en la máxima tensión de operación. La tabla VII representa los valores recomendados por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE).

Tabla VII. **Distancias mínimas de seguridad verticales de conductores sobre vías férreas, el suelo o agua**

Naturaleza de la superficie bajo los conductores	Conductores de comunicación aislados, retenidas, aterrizadas, conductores neutros y cables eléctricos aislados (m)	Cables suministradores aislados de más de 750 V y conductores suministradores en línea abierta de 0 – 750 V (m)	Conductores suministradores en línea abierta arriba de 750 V a 22 kV. (m)	Conductores suministradores en línea abierta arriba de 22 a 470 kV. (m)
Vías férreas	7.2	7.5	8.1	8.1 + 0.01 m por cada kV arriba de 22 kV.
Carreteras, calles, caminos y otras áreas usadas para tránsito	4.7	5.0	5.6	5.6 m + 0.01 m por cada kV arriba de 22 kV.
Aceras o caminos accesibles sólo a peatones	2.9	3.8	4.4	4.4 m + 0.01 m por cada kV arriba de 22 kV.
Aguas donde no está permitida la navegación	4.0	4.6	5.2	5.2 m + 0.01 m por cada kV arriba de 22 kV
Aguas navegables incluyendo lagos, ríos, estanques, arroyos y canales con un área de superficie sin obstrucción de:				6.2/8.7/10.5 ó 12.3 m + 0.01 m por cada kV arriba de 22 kV
a) Hasta 8 ha	5.3	5.6	6.2	
b) Mayor a 8 hasta 80 ha	7.8	8.1	8.7	
c) Mayor de 80 hasta 800 ha	9.6	9.9	10.5	
d) Arriba de 800 ha	11.4	11.7	12.3	

Nota: todas las tensiones son dadas de fase a tierra

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Compendio de normas técnicas emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. p. 130.

Tabla VIII. **Tensión máxima de diseño**

TENSION	
Nominal KV	Máxima de Diseño KV
69	72.5
138	145
230	242

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Compendio de normas técnicas emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. p. 176.

La tabla VIII representa la tabla No. 1 de NTDOST del título II, Criterios generales de diseño, capítulo 1, Diseño de líneas aéreas, artículo 11,4 la selección del nivel de tensión, para una tensión nominal de 230 kV la máxima tensión de diseño será de 242 kV. Por lo tanto, la distancia mínima de seguridad vertical es de:

$$5,6 + 0,01 \left(\frac{242}{\sqrt{3}} \right) = 6,9971 \text{ m} \cong 7 \text{ m}$$

De acuerdo con este resultado, el conductor más bajo en promedio esta arriba de la distancia mínima de seguridad establecida por las Normas técnicas emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE).

4.3. Determinación del campo eléctrico.

Para la simulación realizada en el programa Matlab se utilizó la información de la tabla IX para el cálculo de la capacitancia de la línea de transmisión de 230 kV, esta capacitancia involucra el efecto de la tierra, así como, el efecto de la capacitancia entre las fases de la línea.

Para la estructura utilizada, se tiene 2 conductores por fase; para facilitar los cálculos de la capacitancia se utilizó un conductor equivalente en donde se encontró un radio medio geométrico del conductor equivalente.

Tabla IX. Datos para la simulación en Matlab

No.	Resistencia en Ohm/milla	Radio medio geométrico (pulg.)	Ubicación de las fases en eje X (m)	Ubicación de las fases en eje Y (m)
1	0,196	0,9851	0	9,5
2	0,196	0,9851	0	15
3	0,196	0,9851	0	20,5
4	0,278	1,0019	6	26,8
5	0,278	1,0019	-6	26,8

Fuente: DUNCAN GLOVER, J. Análisis y diseño de sistemas de potencia. Tabla A.4. p. 647.

Para estas simulaciones se toma como condición que la permitividad del aire es 1,0006 veces que la del vacío $\epsilon_0 = 8,85418781762 \times 10^{-12} F/m$. La tabla V presenta los datos calculados por medio de Matlab obteniendo una matriz de capacitancias tanto mutuas como de fase a tierra. La tabla X presenta la información de la matriz de capacitancias calculadas.

Tabla X. **Capacitancias con efecto de tierra**

1,34e-11	3,73e-11	5,55e-11	7,98e-11	7,98e-11
3,73e-11	1,21e-11	2,99e-11	4,80e-11	4,80e-11
5,55e-11	2,99e-11	1,13e-11	3,27e-11	3,27e-11
7,98e-11	4,80e-11	3,27e-11	1,08e-11	3,66e-11
7,98e-11	4,80e-11	3,27e-11	3,66e-11	1,08e-11

Fuente: elaboración propia.

Para conocer la carga eléctrica que posee la línea de transmisión se utilizará la siguiente ecuación para el campo eléctrico:

$$\vec{E} = \frac{q}{2\pi\epsilon r}$$

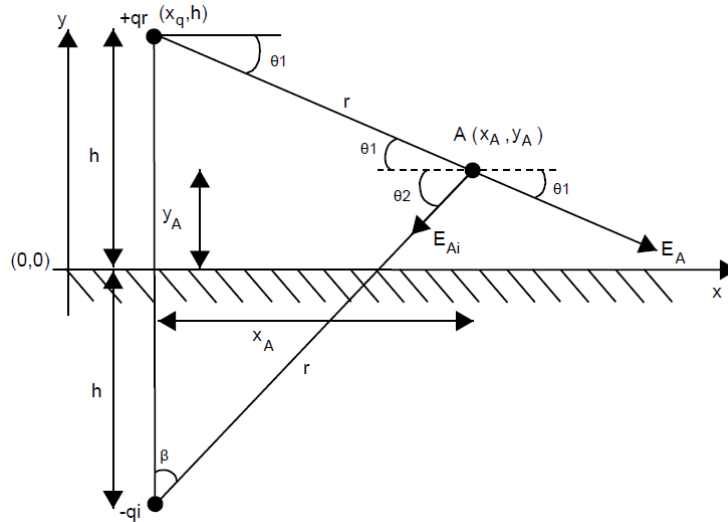
Conociendo el valor de la capacitancia de la línea, en este caso se utilizará la capacitancia mutua que involucra los efectos de carga sobre las otras fases, por medio de la ecuación siguiente se obtendrán los datos necesarios para encontrar el campo eléctrico en términos del radio desde donde se encuentra la carga hacia cualquier punto en el espacio.

$$q = V_{fn} * C_{bus}$$

$$q = (230 \times 10^3 * 1,34 \times 10^{-11}) = 1,7822e - 006 [Coulombs]$$

En la figura 28 se muestra el efecto de la tierra considerando el método de las imágenes, se calcula el campo eléctrico en un punto cualquiera A debido a un conductor.

Figura 28. **Campo eléctrico en un punto debido a un conductor considerando el efecto de la tierra**



Fuente: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1084>. Consulta: 24 de septiembre de 2013.

+qr: conductor real

- qi: conductor imaginario

h: distancia del conductor a tierra

EA: campo eléctrico producido por la carga real en el punto A

E_{Ai}: campo eléctrico producido por la carga imagen en el punto A

Según la ecuación del campo eléctrico para el punto en A es:

$$|\vec{E}_A| = \frac{q}{2\pi\epsilon r}$$

Donde:

$\varepsilon = (1,0006)(8,85418781762 \times 10^{-12}) F/m$, el cual es producido por el conductor real.

$$|\vec{E}_{Ai}| = \frac{q_i}{2\pi\varepsilon r'}$$

El cual es producido por la imagen del conductor.

Las direcciones se muestran en la figura 28.

$$r = \sqrt{(x_q - x_A)^2 + (h - y_A)^2}$$

r es la distancia desde el conductor real a un punto general llamado A.

$$r = \sqrt{(x_q - x_A)^2 + (h - y_A)^2}$$

r' es la distancia desde el conductor imagen a un punto general llamado A.

Descomponiendo horizontal y verticalmente los campos eléctricos y sumando algebraicamente:

$$E_x = |E_A| \cos \theta_1 - |E_{Ai}| \cos \theta_2$$

$$E_y = -|E_A| \sen \theta_1 - |E_{Ai}| \sen \theta_2$$

E_x : campo eléctrico en el eje horizontal.

E_y : campo eléctrico en el eje vertical.

$$\cos \theta_1 = \frac{x_A - x_q}{r}$$

$$\cos \theta_2 = \frac{x_A - x_q}{r'}$$

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{h - y_A}{r}$$

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{h - y_A}{r'}$$

Remplazando las ecuaciones anteriores con las identidades encontradas se obtendrán las siguientes ecuaciones:

$$\vec{E}_x = \frac{q}{2\pi\epsilon} (x_A - x_q) \left[\frac{1}{(x_q - x_A)^2 + (h - y_A)^2} - \frac{1}{(x_q - x_A)^2 + (h + y_A)^2} \right] \vec{a}_x$$

$$\vec{E}_y = \frac{-q}{2\pi\epsilon} \left[\frac{h - y_A}{(x_q - x_A)^2 + (h - y_A)^2} - \frac{h + y_A}{(x_q - x_A)^2 + (h + y_A)^2} \right] \vec{a}_y$$

Donde:

q : es la carga de la línea en Coulombs

x_A : coordenada en que se varía la distancia desde el conductor hacia el punto A en el eje X

x_q : coordenada en el eje X del plano cartesiano donde se encuentra la línea

h : coordenada en el eje Y del plano cartesiano donde se encuentra la línea

y_A : coordenada en que se varía la distancia desde el conductor hacia el punto A en el eje Y

\vec{E}_x : campo eléctrico en el eje X en V/m

\vec{E}_y : campo eléctrico en el eje Y en V/m

Para el campo eléctrico total debido tanto a la componente en X como Y, quedará de la siguiente manera:

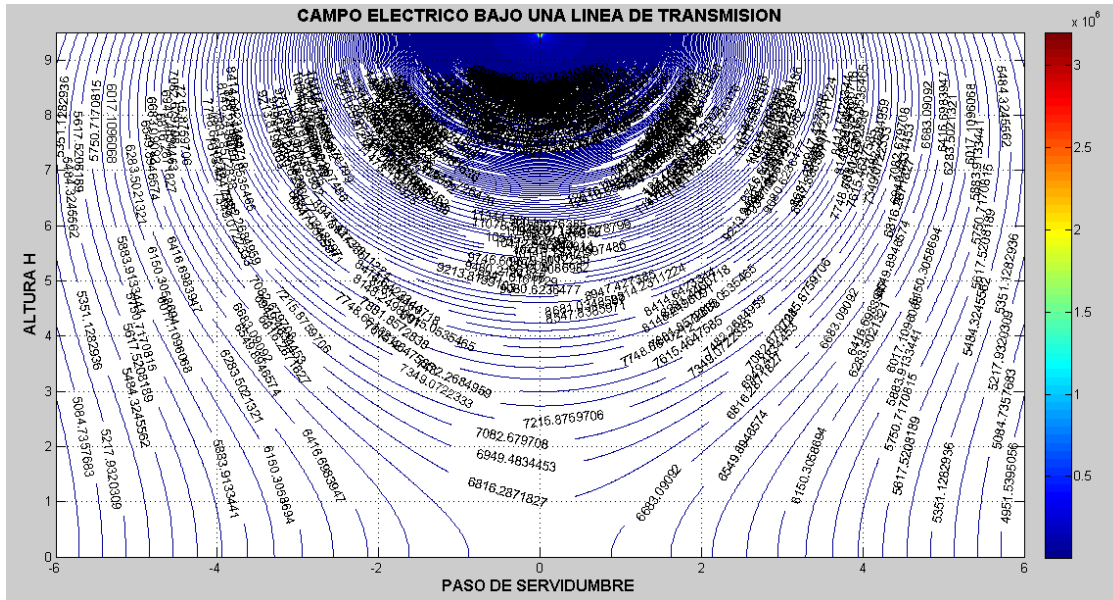
$$|\vec{E}_A| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

Introduciendo estas ecuaciones en Matlab se toma como paso de servidumbre un ancho total de 12 metros y una altura de la línea de transmisión de 9,5 metros arriba del nivel de suelo. La figura 29 representa los niveles de campo eléctrico calculados por medio de Matlab, esta gráfica representa el campo eléctrico que se encuentra debajo de la línea de transmisión. En el apéndice 1 se encuentra la tabla I con los valores calculados según la servidumbre, así como también, las diferentes alturas de referencia respecto a la altura de la línea de transmisión en el punto más bajo.

Pero esta solución no favorece completamente una solución analítica, debido a que la ecuación no puede representarse las fronteras mediante superficies de coordenadas constantes dentro de un único sistema de coordenadas. Es común encontrar estos casos cuando se realiza un mapeo de las curvas del campo eléctrico.

Para encontrar los valores del campo eléctrico configurando la frontera en el nivel del suelo se emplearán métodos numéricos. El cálculo más refinado de estos valores se realiza numéricamente, de tal forma que el resultado final sea consistente con la ecuación de Laplace.

Figura 29. Campo eléctrico bajo una línea de transmisión



Fuente: elaboración propia, con programa de simulación Matlab.

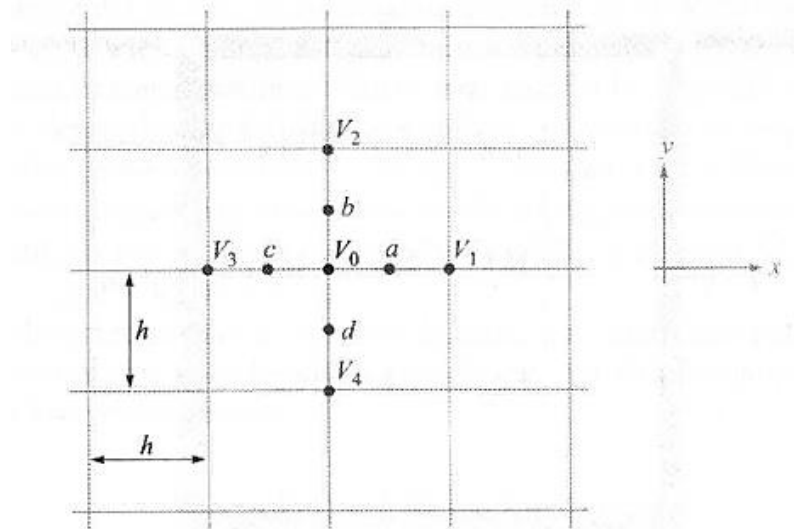
Para esto se tomará que el potencial de la línea no cambia con la coordenada z y se dividirá el interior de una sección transversal de la región donde se desea conocer el potencial en cuadrados con lados de longitud h . La figura 30 muestra una porción de esta región. Los valores desconocidos del potencial en cinco puntos adyacentes se indican por V_0, V_1, V_2, V_3 y V_4 . La ecuación de Laplace en dos dimensiones que debe resolverse es:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0$$

Se pueden obtener valores aproximados para las derivadas parciales en términos del potencial supuesto por medio de:

$$\left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_a = \frac{V_1 - V_0}{h}$$

Figura 30. **Parte de una región que contiene un campo de potencial bidimensional dividido en cuadrados con longitud h por lado**



Fuente: WILLIAM H. HAYT Jr.; Buck John A., Teoría electromagnética. p. 197.

Y

$$\left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_c = \frac{V_0 - V_3}{h}$$

De la cual:

$$\left. \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right|_a = \frac{\left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_a - \left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_c}{h} = \frac{V_1 - V_0 - V_0 + V_3}{h^2}$$

De manera semejante:

$$\left. \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right|_a = \frac{V_2 - V_0 - V_0 + V_4}{h^2}$$

Al combinarse se tiene:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + 4V_0}{h^2} = 0$$

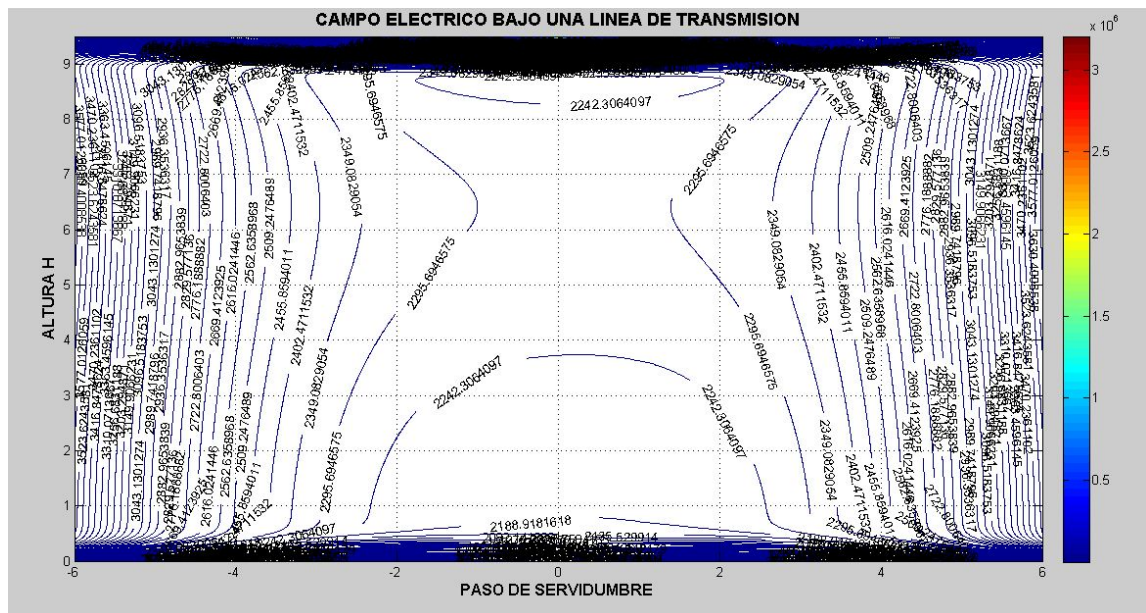
O:

$$V_0 = 1/4 (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)$$

La expresión se toma exacta cuando h se aproxima a cero y puede escribirse sin el signo de aproximación. Esto es correcto en forma intuitiva, y dice que el potencial es el promedio del potencial de los cuatro puntos vecinos. El método iterativo simplemente se utiliza para determinar el potencial en la esquina de cada subdivisión cuadrada considerándolas una por una y entonces el proceso se repite a lo largo de toda la región tantas veces como sea necesario hasta que los valores no cambien más.

En la figura 31 se representan los valores del campo eléctrico al aplicar el método numérico por medio de la tabla I (véase apéndice 1), encontrando nuevos valores para el campo eléctrico en este caso se toma como frontera el nivel del suelo, obteniendo la tabla II (véase apéndice 2).

Figura 31. **Campo eléctrico bajo una línea de transmisión de 230 kV por medio del método numérico**



Fuente: elaboración propia, con programa de simulación Matlab.

Comparando los valores encontrados en la simulación según los datos de la tabla II del apéndice 2 con respecto a la tabla V, se puede notar que los valores calculados están por debajo de los niveles de referencia aprobados por la Organización Mundial de la Salud.

4.4. Determinación del campo magnético

Para la determinación del campo magnético en las líneas de transmisión de 230 kV se tomaron las siguientes consideraciones:

- Se desprecia la influencia de estructuras como torres, soportes u otros objetos. La anterior suposición implica que se tendrá la misma condición a lo largo de toda la línea y, por tanto, solo es necesario realizar cálculos en un plano perpendicular al eje de la línea, es decir, en dos dimensiones.
- Se desprecia el efecto del campo magnético producido por la corriente inducida en el cable de guarda sobre la línea de transmisión.
- Se asume que las corrientes en las fases de la línea se encuentran balanceadas.
- Al igual que en el cálculo del campo eléctrico, la altura del conductor más cercano al nivel del suelo será de 9,5 metros, el paso de servidumbre será de 12 metros.

La base para el cálculo del campo magnético es la ley de Biot – Savart que, con base en las suposiciones anteriores, permite determinar el campo magnético en algún punto del espacio en términos de la corriente. Primero se calculará el campo generado por cada conductor que conforma la línea de transmisión, luego se hará la suma vectorial de cada uno de los campos para encontrar el campo total dado por:

$$d\vec{H} = \frac{Id\vec{L} \sin \theta}{4\pi r^2} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$$

Al utilizar la ley de Biot – Savart, con respecto a la línea de transmisión el análisis tiende ser bastante complejo, en este caso se utilizará por conveniencia

la ley de Ampere, la cual establece que la integral de línea de \vec{H} sobre cualquier trayectoria cerrada es exactamente igual a la corriente encerrada por dicha trayectoria,

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{L} = I$$

Para encontrar la corriente encerrada en un conductor largo refiriéndose a la figura 32, se elige una trayectoria para la cual \vec{H} sea perpendicular a algunas de sus secciones o tangencial, o mantenga su magnitud H constante. El primer requisito permite sustituir el producto de la ley circuital de Ampere con el producto de magnitudes escalares, excepto a lo largo de aquellas porciones de la trayectoria donde \vec{H} sea normal a la trayectoria, en cuyo caso el producto punto es cero; el segundo requisito permite sacar la intensidad del campo magnético del símbolo de la integral,

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{L} = I$$

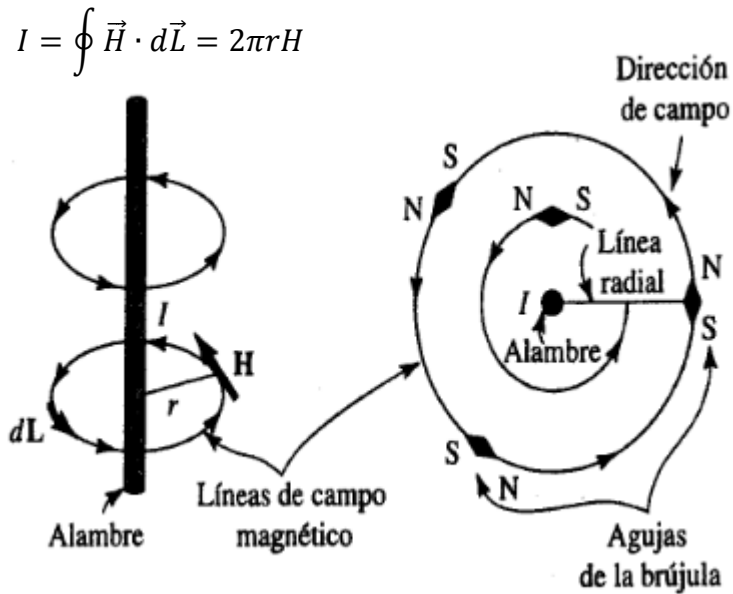
$$\oint \vec{H} a_\phi \cdot d\vec{L} a_\phi = I$$

$$\oint H \cdot dL = I$$

$$\int_0^{2\pi} H r d\phi = H r \int_0^{2\pi} d\phi = H 2\pi r = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

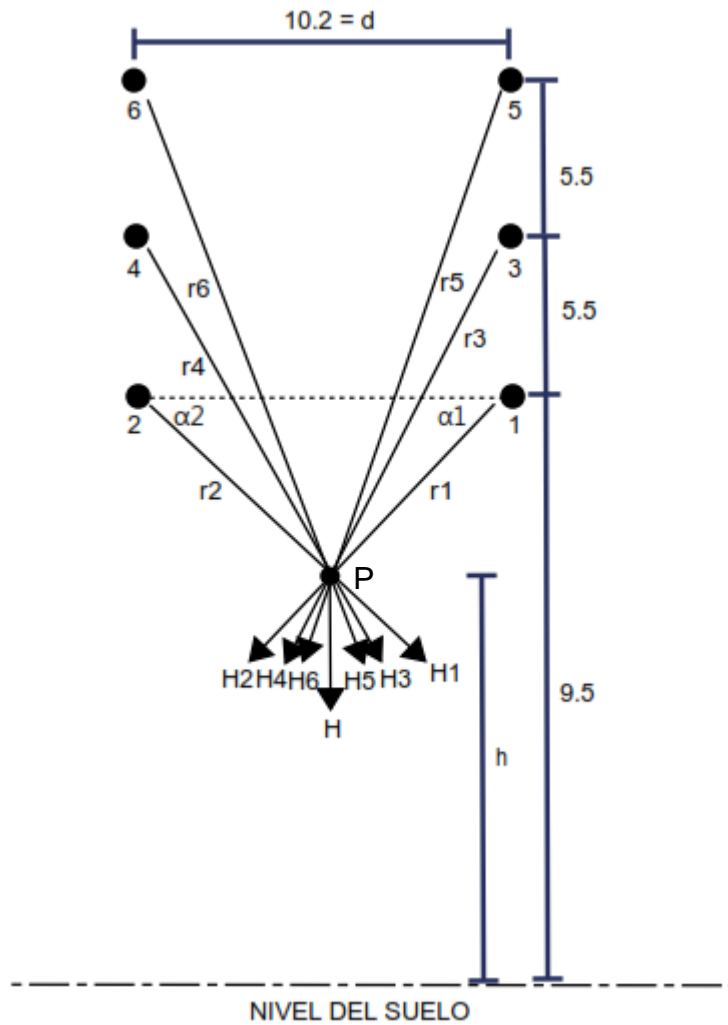
Figura 32. **Campo magnético H alrededor de un alambre portador de corriente**



Fuente: KRAUSS, John D. Electromagnetismo con aplicaciones. p. 88.

Para encontrar el campo magnético de una línea de transmisión de dos conductores por fase se tomará la figura 33 como ejemplo, para encontrar la ecuación que se adecúa a las condiciones antes mencionadas.

Figura 33. **Campo magnético H para una línea de transmisión de dos conductores**



Fuente: elaboración propia, con programa Nitro Pro 8.

Si

$$\vec{H} = H_1 \cos \alpha_1 + H_2 \cos \alpha_2 + H_3 \cos \alpha_3 + H_4 \cos \alpha_4 + H_5 \cos \alpha_5 + H_6 \cos \alpha_6$$

Si

$$I_A = I_B = I_C = 670 \text{ A}$$

Entonces:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = 670 \text{ A}$$

Por lo tanto,

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi} * \left[\frac{\cos \alpha_1}{r_1} + \frac{\cos \alpha_2}{r_2} + \frac{\cos \alpha_3}{r_3} + \frac{\cos \alpha_4}{r_4} + \frac{\cos \alpha_5}{r_5} + \frac{\cos \alpha_6}{r_6} \right]$$

Si

$$\cos \alpha_1 = \frac{5.1 - x_p}{r_1} \therefore r_1 = \sqrt{(5.1 - x_p)^2 + (9.5 - h)^2}$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{-5.1 - x_p}{r_2} \therefore r_2 = \sqrt{(-5.1 - x_p)^2 + (9.5 - h)^2}$$

$$\cos \alpha_3 = \frac{5.1 - x_p}{r_3} \therefore r_3 = \sqrt{(5.1 - x_p)^2 + (15 - h)^2}$$

$$\cos \alpha_4 = \frac{-5.1 - x_p}{r_4} \therefore r_4 = \sqrt{(-5.1 - x_p)^2 + (15 - h)^2}$$

$$\cos \alpha_5 = \frac{5.1 - x_p}{r_5} \therefore r_5 = \sqrt{(5.1 - x_p)^2 + (20.5 - h)^2}$$

$$\cos \alpha_6 = \frac{-5.1 - x_p}{r_6} \therefore r_6 = \sqrt{(-5.1 - x_p)^2 + (20.5 - h)^2}$$

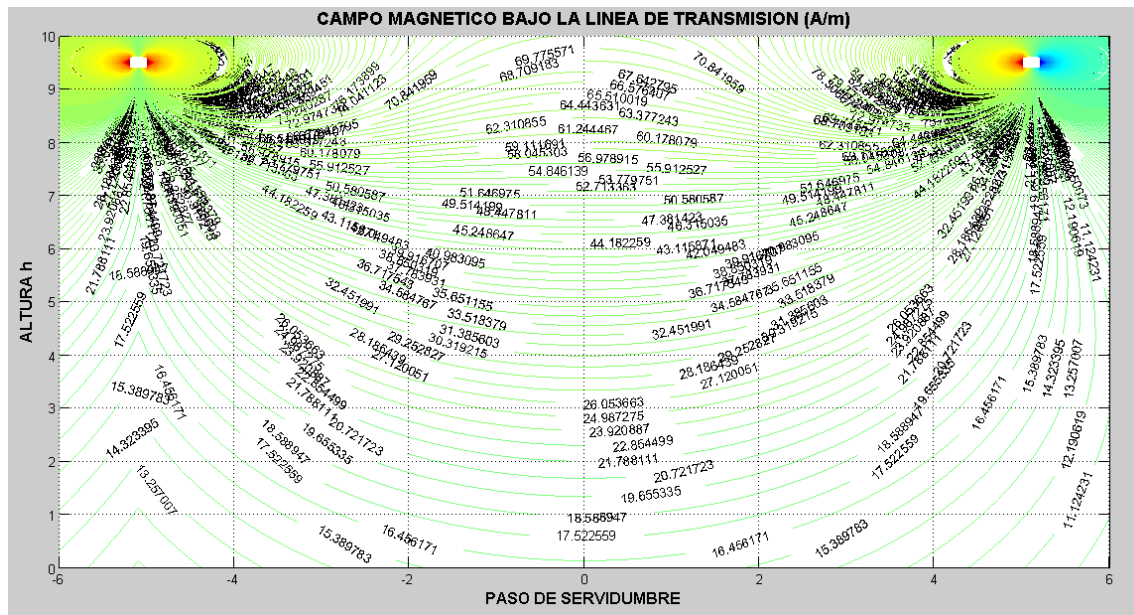
Sustituyendo las identidades encontradas en la ecuación anterior, se tiene:

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi} * \left[\frac{5.1 - x_p}{(5.1 - x_p)^2 + (9.5 - h)^2} + \frac{|-5.1 - x_p|}{(-5.1 - x_p)^2 + (9.5 - h)^2} \right. \\ \left. + \frac{5.1 - x_p}{(5.1 - x_p)^2 + (15 - h)^2} + \frac{|-5.1 - x_p|}{(-5.1 - x_p)^2 + (15 - h)^2} \right. \\ \left. + \frac{5.1 - x_p}{(5.1 - x_p)^2 + (20.5 - h)^2} + \frac{|-5.1 - x_p|}{(5.1 - x_p)^2 + (20.5 - h)^2} \right]$$

Introduciendo estas ecuaciones en Matlab, se toma como paso de servidumbre un ancho total de 12 metros y una altura de la línea de transmisión de 9,5 metros arriba del nivel de suelo. La figura 34 representa los niveles de campo magnético calculados por medio de Matlab, esta gráfica representa el campo magnético que se encuentra debajo de la línea de transmisión.

En el apéndice 3 se encuentra la tabla III con los valores calculados según la servidumbre, así como también, las diferentes alturas de referencia respecto a la altura de la línea de transmisión en el punto más bajo.

Figura 34. **Campo magnético en líneas de transmisión 230 kV**



Fuente: elaboración propia, con programa de simulación Matlab.

En la siguiente simulación se encontrará el campo magnético de una línea de transmisión de 230 kV, en este caso se trata de la línea de transmisión que sale de la subestación Los Brillantes hacia la subestación Palo Gordo, a continuación se presentan los datos de dicha línea.

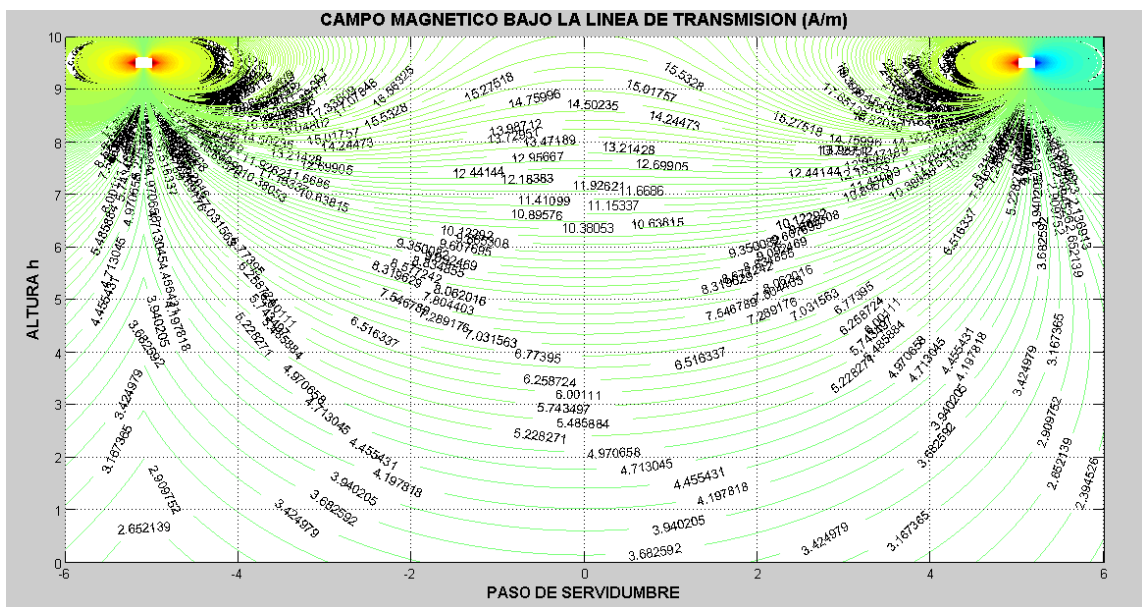
Tabla XI. **Datos de la línea Los Brillantes – Palo Gordo**

Descripción	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)
Corriente de fase de la línea	161,870	126,694	144,444

Fuente: Datos proporcionados por Administrador del Mercado Mayorista (AMM).

La potencia de la línea de transmisión es de 47,9644 MW estos datos fueron tomados para un horario específico de 16:52 horas, utilizando las ecuaciones anteriores para la simulación respectiva en Matlab, se tienen los siguientes resultados.

Figura 35. **Campo magnético de la línea de transmisión de 230 kV de S/E Los Brillantes hacia S/E Palo Gordo**



Fuente: elaboración propia, con programa de simulación Matlab.

En el apéndice 4 se encuentra la tabla IV con los valores calculados según la servidumbre, así como también, las diferentes alturas de referencia respecto a la altura de la línea de transmisión en el punto más bajo.

Realizando la comparación de los datos calculados para un sistema ideal en el cual la corriente de cada fase de la línea es la misma y con un sistema real en el cual la corriente de cada fase no son iguales, se tiene que los valores

del campo magnético en un sistema real están por debajo de los niveles de referencia aprobados por la Organización Mundial de la Salud, según la tabla V.

El Departamento de Radiaciones no Ionizantes de la Dirección General de Energía del Ministerio de Energía y Minas realiza la medición de los campos eléctricos y magnéticos. Algunas de estas mediciones se tomaron en cuenta con la comparación de los resultados teóricos con los medidos en el campo bajo ciertas líneas de transmisión. Estas mediciones se pueden encontrar en el anexo 3, 4 y 5.

CONCLUSIONES

1. Los resultados teóricos encontrados a partir de la modelación del campo eléctrico y magnético son cercanos en magnitud a los que se obtuvieron por mediciones en campo realizado por el Departamento de Radiaciones no Ionizantes del Ministerio de Energía y Minas.
2. La distribución espacial de las superficies equipotenciales son distintas cuando existen fronteras de potencial, como la que representa el suelo debajo de una línea transmisión haciendo variar las magnitudes de dichas superficies, para el caso en el que no se toma ninguna frontera como referencia.
3. Los valores obtenidos en el análisis teórico del campo eléctrico en condiciones muy parecidas con la topografía del suelo se tiene que dichos valores son cercanos en magnitud a los que se obtuvieron por mediciones en campo realizado por el Departamento de Radiaciones no Ionizantes de la Dirección General de Energía.
4. Los valores obtenidos en el análisis teórico de campo magnético con el flujo máximo de corriente que puede soportar el conductor, están por encima de los valores calculados con los datos reales del flujo de corriente de la línea Los Brillantes – Palo Gordo, debido a que en esta línea solamente fluye una parte de la corriente total.

5. Los datos obtenidos por medio del modelo del campo eléctrico y magnético están por debajo de los niveles de referencia aprobados por la Organización Mundial de la Salud.

RECOMENDACIONES

1. Tener un detalle específico de las condiciones topográficas en la que se encuentra la línea de transmisión para un análisis con todas las variables que no se tomaron en cuenta en el modelo del campo eléctrico.
2. Solicitar al Administrador del Mercado Mayorista los valores del flujo de corriente máximos en la línea de transmisión analizada al hacer una medición de campo, para obtener datos concisos para el campo magnético en una hora específica.
3. Para mejorar el modelo propuesto es importante tener en cuenta todas las condiciones reales del ambiente en el que se desea conocer el campo eléctrico y magnético, entre ellas: la altura sobre el nivel del mar, la humedad, la temperatura, la influencia de las estructuras como torres, soportes u otros objetos y, el efecto del campo magnético producido por la corriente inducida en el cable de guarda sobre la línea de transmisión.

BIBLIOGRAFÍA

1. GARCÍA, Ángel Franco. *Método de las imágenes* [en línea]. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/default.htm>. [Consulta: 14 de agosto de 2013].
2. GARZÓN VALENCIA, Diego Fernando. *Cálculo del campo eléctrico bajo líneas de transmisión* [en línea]. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1084>. [Consulta: 24 de septiembre de 2013].
3. GLOVER, Duncan J. *Sistemas de potencia, análisis y diseño*. 3a ed. México: International Thomson, 2004. 647 p. ISBN: 0-534-95367-0.
4. HAYT, William H. *Teoría electromagnética*. 7a ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2006. 582 p. ISBN: 970-10-5620-5.
5. International Commission on Non-ionizing Radiation Protection [en línea]. <http://www.icnirp.de/documents/emfgdlesp.pdf>. [Consulta: 24 de octubre de 2013].
6. KRAUSS, John D.; FLEISCH, Daniel A. *Electromagnetismo con aplicaciones*. 5a ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2000. 671 p. ISBN: 0-07-289969-7.

7. SADIKU, Matthew N. O. *Elementos de electromagnetismo*. 3a ed. U.S.A.: Oxford University Press, Inc. New York, N.Y. U.S.A., 2003. 767 p. ISBN: 970-613-672-X.

APÉNDICES

- Apéndice 1 Tabla I. Campo eléctrico bajo una línea de transmisión de 230 kV.
- Apéndice 2 Tabla II. Campo eléctrico bajo una línea de transmisión de 230 kV por medio del método numérico.
- Apéndice 3 Tabla III. Campo magnético bajo una línea de transmisión de 230 kV.
- Apéndice 4 Tabla IV. Campo magnético bajo una línea de transmisión de 230 kV de la subestación Los Brillantes hacia Palo Gordo.

Apéndice 1. Campo eléctrico bajo una línea de transmisión de 230 kV

ALTURA/ SERV/DUMBRE	-6.00	-5.50	-5.00	-4.50	-4.00	-3.50	-3.00	-2.50	-2.00	-1.50	-1.00	-0.50	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	2172.87	1631.13	1303.43	1101.35	976.02	899.11	852.98	826.17	811.16	803.09	798.95	796.96	796.17
0.20	3029.20	2528.67	2156.14	1892.39	1713.34	1596.58	1523.53	1479.73	1454.62	1440.86	1433.69	1430.20	1428.80
0.30	3354.13	2934.35	2595.89	2338.81	2154.05	2028.09	1946.50	1896.24	1866.78	1850.35	1841.66	1837.37	1835.63
0.40	3480.37	3103.21	2791.64	2548.93	2370.32	2245.95	2163.91	2112.57	2082.08	2064.87	2055.67	2051.10	2049.22
0.50	3526.24	3166.40	2867.40	2632.89	2459.07	2337.18	2256.23	2205.27	2174.81	2157.54	2148.26	2143.63	2141.72
0.60	3541.42	3187.40	2892.95	2661.69	2490.00	2369.41	2289.17	2238.56	2208.27	2191.07	2181.81	2177.17	2175.26
0.70	3546.35	3193.94	2900.79	2670.51	2499.52	2379.37	2299.41	2248.96	2218.75	2201.59	2192.34	2187.71	2185.80
0.80	3548.41	3196.30	2903.42	2673.34	2502.50	2382.46	2302.56	2252.15	2221.96	2204.81	2195.57	2190.94	2189.04
0.90	3549.87	3197.73	2904.81	2674.72	2503.86	2383.81	2303.91	2253.49	2223.30	2206.15	2196.91	2192.28	2190.37
1.00	3551.31	3199.04	2906.03	2675.86	2504.94	2384.85	2304.92	2254.49	2224.29	2207.12	2197.88	2193.26	2191.35
1.20	3554.55	3201.97	2908.69	2678.31	2507.24	2387.04	2307.04	2256.56	2226.34	2209.16	2199.91	2195.28	2193.36
1.30	3556.38	3203.62	2910.18	2679.68	2508.53	2388.26	2308.22	2257.72	2227.48	2210.29	2201.04	2196.40	2194.49
1.40	3558.35	3205.38	2911.79	2681.16	2509.91	2389.58	2309.50	2258.96	2228.71	2211.51	2202.25	2197.62	2195.70
1.50	3560.44	3207.27	2913.50	2682.74	2511.39	2390.99	2310.86	2260.30	2230.02	2212.81	2203.55	2198.91	2197.00
1.60	3562.68	3209.28	2915.33	2684.42	2512.96	2392.48	2312.30	2261.71	2231.42	2214.20	2204.93	2200.29	2198.37
1.70	3565.03	3211.41	2917.25	2686.19	2514.62	2394.07	2313.83	2263.20	2232.89	2215.66	2206.39	2201.74	2199.82
1.80	3567.52	3213.64	2919.29	2688.06	2516.37	2395.73	2315.44	2264.78	2234.45	2217.20	2207.92	2203.27	2201.36
1.90	3570.13	3215.99	2921.42	2690.03	2518.21	2397.48	2317.13	2266.43	2236.08	2218.82	2209.53	2204.88	2202.96
2.00	3572.86	3218.45	2923.65	2692.08	2520.13	2399.31	2318.90	2268.16	2237.78	2220.52	2211.22	2206.56	2204.64
2.10	3575.70	3221.01	2925.97	2694.22	2522.13	2401.22	2320.74	2269.96	2239.56	2222.28	2212.98	2208.32	2206.40
2.20	3578.65	3223.67	2928.39	2696.44	2524.21	2403.20	2322.66	2271.84	2241.41	2224.11	2214.80	2210.14	2208.22
2.30	3581.72	3226.43	2930.89	2698.75	2526.37	2405.25	2324.64	2273.78	2243.33	2226.02	2216.70	2212.03	2210.10
2.40	3584.89	3229.28	2933.48	2701.13	2528.60	2407.38	2326.69	2275.79	2245.31	2227.98	2218.65	2213.98	2212.05
2.50	3588.15	3232.22	2936.15	2703.59	2530.90	2409.57	2328.81	2277.86	2247.35	2230.01	2220.67	2216.00	2214.07
2.60	3591.51	3235.24	2938.90	2706.12	2533.27	2411.82	2330.99	2279.99	2249.45	2232.09	2222.75	2218.07	2216.14
2.70	3594.96	3238.35	2941.72	2708.71	2535.70	2414.13	2333.22	2282.17	2251.61	2234.23	2224.88	2220.20	2218.26
2.80	3598.50	3241.53	2944.61	2711.37	2538.19	2416.50	2335.51	2284.41	2253.81	2236.42	2227.06	2222.37	2220.44
2.90	3602.11	3244.78	2947.56	2714.09	2540.73	2418.92	2337.85	2286.70	2256.07	2238.66	2229.29	2224.60	2222.66
3.00	3605.79	3248.10	2950.57	2716.86	2543.32	2421.39	2340.24	2289.03	2258.38	2240.95	2231.57	2226.87	2224.93
3.10	3609.54	3251.48	2953.64	2719.68	2545.96	2423.90	2342.67	2291.41	2260.72	2243.28	2233.89	2229.18	2227.24
3.20	3613.35	3254.90	2956.75	2722.55	2548.65	2426.46	2345.14	2293.82	2263.10	2245.64	2236.24	2231.53	2229.59
3.30	3617.22	3258.38	2959.91	2725.46	2551.37	2429.05	2347.64	2296.27	2265.51	2248.03	2238.62	2233.91	2231.97
3.40	3621.12	3261.90	2963.10	2728.40	2554.12	2431.66	2350.17	2298.75	2267.96	2250.46	2241.04	2236.32	2234.37
3.50	3625.07	3265.45	2966.33	2731.36	2556.90	2434.31	2352.72	2301.25	2270.42	2252.90	2243.47	2238.75	2236.80
3.60	3629.05	3269.03	2969.58	2734.36	2559.70	2436.97	2355.30	2303.76	2272.91	2255.37	2245.93	2241.20	2239.25
3.70	3633.05	3272.63	2972.84	2737.36	2562.51	2439.65	2357.89	2306.30	2275.41	2257.85	2248.40	2243.66	2241.71
3.80	3637.06	3276.24	2976.12	2740.38	2565.33	2442.34	2360.49	2308.84	2277.91	2260.34	2250.87	2246.13	2244.18
3.90	3641.08	3279.86	2979.41	2743.40	2568.16	2445.03	2363.09	2311.38	2280.42	2262.83	2253.35	2248.61	2246.65
4.00	3645.09	3283.47	2982.68	2746.42	2570.99	2447.72	2365.68	2313.92	2282.93	2265.31	2255.83	2251.08	2249.12
4.10	3649.09	3287.07	2985.95	2749.43	2573.80	2450.40	2368.27	2316.45	2285.43	2267.79	2258.30	2253.54	2251.58
4.20	3653.07	3290.65	2989.20	2752.42	2576.60	2453.06	2370.84	2318.97	2287.91	2270.25	2260.75	2255.99	2254.03
4.30	3657.01	3294.20	2992.42	2755.38	2579.37	2455.70	2373.39	2321.46	2290.37	2272.69	2263.18	2258.42	2256.45
4.40	3660.90	3297.70	2995.60	2758.31	2582.11	2458.31	2375.92	2323.93	2292.80	2275.11	2265.58	2260.81	2258.85
4.50	3664.74	3301.16	2998.74	2761.19	2584.81	2460.88	2378.40	2326.36	2295.20	2277.49	2267.95	2263.18	2261.21
4.60	3668.52	3304.55	3001.82	2764.03	2587.46	2463.40	2380.84	2328.74	2297.55	2279.82	2270.28	2265.50	2263.53
4.70	3672.21	3307.88	3004.84	2766.81	2590.06	2465.88	2383.23	2331.08	2299.86	2282.11	2272.56	2267.77	2265.80
4.80	3675.82	3311.12	3007.78	2769.51	2592.59	2468.29	2385.56	2333.36	2302.10	2284.34	2274.78	2269.99	2268.01
4.90	3679.32	3314.27	3010.64	2772.14	2595.05	2470.63	2387.82	2335.57	2304.29	2286.50	2276.93	2272.14	2270.16
5.00	3682.70	3317.31	3013.40	2774.68	2597.43	2472.89	2390.01	2337.71	2306.39	2288.60	2279.01	2274.22	2272.24
5.10	3686.95	3320.24	3016.06	2777.13	2599.72	2475.07	2392.11	2339.76	2308.42	2290.61	2281.02	2276.22	2274.23
5.20	3689.06	3323.04	3018.59	2779.46	2601.90	2477.14	2394.12	2341.73	2310.36	2292.53	2282.93	2278.12	2276.14
5.30	3692.02	3325.69	3021.00	2781.68	2603.98	2479.12	2396.02	2343.59	2312.20	2294.35	2284.75	2279.94	2277.95
5.40	3694.80	3328.19	3023.27	2783.77	2605.93	2480.97	2397.82	2345.34	2313.93	2296.07	2286.46	2281.64	2279.66
5.50	3697.39	3330.53	3025.39	2785.71	2607.75	2482.71	2399.49	2346.98	2315.54	2297.67	2288.05	2283.24	2281.25
5.60	3699.79	3332.68	3027.34	2787.51	2609.43	2484.30	2401.03	2348.49	2317.03	2299.15	2289.52	2284.70	2282.71
5.70	3701.97	3334.64	3029.12	2789.14	2610.96	2485.76	2402.44	2349.86	2318.38	2300.49	2290.86	2286.04	2284.05
5.80	3703.92	3336.39	3030.71	2790.60	2612.32	2487.06	2403.69	2351.09	2319.59	2301.69	2292.05	2287.23	2285.24
5.90	3705.62	3337.92	3032.09	2791.87	2613.51	2488.19	2404.78	2352.16	2320.65	2302.74	2293.09	2288.27	2286.27
6.00	3707.06	3339.21	3033.26	2792.95	2614.51	2489.14	2405.70	2353.06	2321.54	2303.62	2293.97	2289.14	2287.15
6.10	3708.22	3340.25	3034.20	2793.82	2615.32	2489.91	2406.45	2353.78	2322.25	2304.33	2294.68	2289.85	2287.85
6.20	3709.09	3341.03	3034.91	2794.46	2615.93	2490.48	2407.00	2354.32	2322.78	2304.85	2295.20	2290.37	2288.38
6.30	3709.65	3341.53	3035.36	2794.87	2616.31	2490.85	2407.35	2354.66	2323.12	2305.19	2295.54	2290.70	2288.71
6.40	3709.88	3341.73	3035.54	2795.04	2616.46	2490.99	2407.49	2354.80	2323.25	2305.32	2295.67	2290.83	2288.84
6.50	3709.77	3341.63	3035.44	2794.94	2616.37	2490.91	2407.40	2354.72	2323.17	2305.24	2295.58	2290.75	2288.76
6.60	3709.30	3341.20	3035.05	2794.58	2616.03	2490.58	2407.09	2354.41	2322.86	2304.93	2295.28	2290.45	2288.45
6.70	3708.46	3340.44	3034.35	2793.94	2615.43	2490.00	2406.53	2353.86	2322.32	2304.40	2294.75	2289.91	2287.92
6.80	3707.22	3339.32	3033.34	2793.00	2614.55	2489.16	2405.72	2353.06	2321.54	2303.62	2293.97	2289.14	2287.15
6.90	3705.58	3337.84	3031.99	2791.75	2613.38	2488.05	2404.64	2352.01	2320.50	2302.59	2292.94	2288.11	2286.12
6.98	3703.97	3336.38	3030.66	2790.53	2612.23	2486.96	2403.58	2350.97	2319.48	2301.57	2291.93	2287.11	2285.11
6.99	3703.75	3336.19	3030.48	2790.36	2612.08	2486.81	2403.44	2350.83	2319.34	2301.43	2291.80	2286.97	2284.98
7.00	3703.52	3335.98	3030.29	2790.19	2611.92	2486.66	2403.29	2350.6					

Continuación del apéndice 1.

7.70	3676.06	3311.22	3007.78	2769.45	2592.49	2468.15	2385.40	2333.18	2301.92	2284.15	2274.58	2269.79	2267.81
7.80	3670.12	3305.86	3002.92	2764.97	2588.29	2464.15	2381.53	2329.40	2298.19	2280.44	2270.89	2266.11	2264.13
7.90	3663.63	3300.02	2997.60	2760.08	2583.71	2459.79	2377.31	2325.27	2294.11	2276.40	2266.87	2262.09	2260.12
8.00	3656.59	3293.68	2991.84	2754.77	2578.74	2455.06	2372.74	2320.80	2289.70	2272.02	2262.50	2257.74	2255.77
8.30	3632.08	3271.59	2971.78	2736.29	2561.44	2438.58	2356.81	2305.22	2274.33	2256.77	2247.31	2242.58	2240.62
8.40	3622.75	3263.19	2964.14	2729.26	2554.86	2432.32	2350.76	2299.29	2268.48	2250.96	2241.53	2236.81	2234.86
8.50	3612.84	3254.26	2956.03	2721.79	2547.87	2425.66	2344.33	2293.01	2262.28	2244.81	2235.41	2230.71	2228.76
8.60	3602.35	3244.83	2947.48	2713.93	2540.52	2418.69	2337.62	2286.48	2255.89	2238.53	2229.21	2224.56	2222.65
8.70	3591.40	3235.06	2938.72	2706.01	2533.30	2412.08	2331.59	2281.08	2251.16	2234.51	2225.88	2221.80	2220.25
8.80	3580.74	3226.17	2931.53	2700.57	2529.87	2411.21	2334.14	2288.09	2263.63	2253.04	2245.28	2240.91	2239.01
8.90	3574.25	3224.39	2935.23	2711.40	2550.85	2447.16	2391.65	2374.81	2386.54	2416.01	2451.61	2482.04	2498.28
9.00	3586.63	3253.57	2985.84	2792.43	2678.07	2645.09	2693.93	2820.80	3012.85	3243.37	3471.14	3647.50	3730.60
9.10	3656.94	3376.56	3177.52	3083.87	3124.05	3333.22	3749.25	4398.23	5268.42	6280.51	7273.68	8032.15	8359.58
9.20	3850.97	3695.78	3656.77	3792.06	4187.46	4966.00	6284.67	8301.93	11096.19	14528.87	18098.20	20931.10	22097.73
9.30	4217.86	4277.13	4493.09	4966.09	5860.49	7440.58	10107.86	14418.22	21018.24	30344.97	41807.73	52469.27	57127.88
9.40	4705.82	5020.79	5493.02	6222.98	7382.52	9271.55	12417.82	17767.75	27080.34	43743.49	73935.98	122702.29	157923.58
9.50	5088.42	5591.64	6192.49	6923.28	7832.46	8996.24	10541.61	12697.21	15920.35	21278.21	31972.37	64011.09	

ALTURA/ SERVIDUMBRE	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	796.21	797.23	799.97	806.09	818.59	842.55	885.95	960.85	1085.52	1288.65	1619.05	2164.63
0.20	1428.86	1430.63	1435.36	1445.72	1466.55	1505.55	1574.12	1687.77	1866.09	2132.03	2509.45	3016.54
0.30	1835.69	1837.83	1843.50	1855.79	1880.09	1924.70	2001.16	2123.83	2308.32	2568.69	2913.49	3341.19
0.40	2049.27	2051.52	2057.48	2070.29	2095.38	2140.90	2217.84	2339.22	2518.17	2764.99	3083.69	3469.18
0.50	2141.76	2144.03	2150.02	2162.87	2187.92	2233.16	2309.21	2428.46	2603.08	2842.18	3148.67	3516.85
0.60	2175.30	2177.56	2183.54	2196.35	2221.30	2266.27	2341.77	2459.93	2632.66	2868.75	3170.83	3533.12
0.70	2185.84	2188.11	2194.08	2206.87	2231.76	2276.63	2351.93	2469.74	2641.87	2877.06	3177.88	3538.52
0.80	2189.08	2191.34	2197.31	2210.09	2234.98	2279.83	2355.08	2472.82	2644.84	2879.85	3180.42	3540.74
0.90	2190.41	2192.68	2198.65	2211.43	2236.32	2281.18	2356.45	2474.20	2646.25	2881.29	3181.89	3542.24
1.00	2191.39	2193.65	2199.62	2212.42	2237.31	2282.19	2357.48	2475.28	2647.38	2882.51	3183.22	3543.69
1.20	2193.40	2195.67	2201.65	2214.45	2239.37	2284.29	2359.65	2477.55	2649.81	2885.15	3186.13	3546.93
1.30	2194.53	2196.80	2202.78	2215.59	2240.52	2285.46	2360.86	2478.82	2651.17	2886.63	3187.77	3548.76
1.40	2195.74	2198.01	2203.99	2216.81	2241.76	2286.72	2362.16	2480.19	2652.64	2888.22	3189.53	3550.72
1.50	2197.04	2199.31	2205.29	2218.12	2243.08	2288.07	2363.55	2481.65	2654.20	2889.92	3191.41	3552.81
1.60	2198.41	2200.68	2206.67	2219.51	2244.48	2289.50	2365.03	2483.20	2655.86	2891.73	3193.41	3555.04
1.70	2199.86	2202.14	2208.13	2220.97	2245.96	2291.01	2366.59	2484.85	2657.62	2893.65	3195.52	3557.39
1.80	2201.40	2203.67	2209.67	2222.52	2247.53	2292.61	2368.24	2486.57	2659.47	2895.66	3197.74	3559.87
1.90	2203.00	2205.28	2211.28	2224.14	2249.17	2294.28	2369.97	2488.39	2661.41	2897.78	3200.08	3562.47
2.00	2204.68	2206.96	2212.97	2225.84	2250.88	2296.03	2371.78	2490.29	2663.44	2899.99	3202.52	3565.20
2.10	2206.44	2208.72	2214.73	2227.61	2252.67	2297.86	2373.66	2492.27	2665.56	2902.29	3205.07	3568.03
2.20	2208.26	2210.54	2216.56	2229.45	2254.53	2299.75	2375.62	2494.32	2667.76	2904.69	3207.72	3570.98
2.30	2210.14	2212.43	2218.45	2231.35	2256.46	2301.72	2377.65	2496.46	2670.04	2907.17	3210.46	3574.04
2.40	2212.10	2214.39	2220.41	2233.32	2258.45	2303.75	2379.75	2498.66	2672.39	2909.74	3213.30	3577.20
2.50	2214.11	2216.39	2222.43	2235.35	2260.51	2305.85	2381.92	2500.93	2674.83	2912.39	3216.23	3580.46
2.60	2216.18	2218.47	2224.51	2237.44	2262.62	2308.00	2384.14	2503.27	2677.33	2915.11	3219.24	3583.81
2.70	2218.30	2220.59	2226.64	2239.59	2264.79	2310.21	2386.43	2505.67	2679.90	2917.91	3222.33	3587.25
2.80	2220.48	2222.77	2228.82	2241.79	2267.01	2312.48	2388.77	2508.13	2682.53	2920.78	3225.49	3590.78
2.90	2222.70	2225.00	2231.06	2244.03	2269.28	2314.80	2391.16	2510.64	2685.21	2923.70	3228.73	3594.38
3.00	2224.97	2227.27	2233.33	2246.32	2271.60	2317.16	2393.60	2513.21	2687.96	2926.69	3232.03	3598.06
3.10	2227.28	2229.58	2235.65	2248.65	2273.96	2319.57	2396.09	2515.82	2690.75	2929.73	3235.39	3601.80
3.20	2229.63	2231.93	2238.01	2251.02	2276.35	2322.01	2398.61	2518.47	2693.58	2932.82	3238.80	3605.61
3.30	2232.01	2234.31	2240.39	2253.42	2278.78	2324.49	2401.17	2521.15	2696.46	2935.95	3242.26	3609.46
3.40	2234.41	2236.72	2242.81	2255.85	2281.24	2326.99	2403.76	2523.87	2699.37	2939.12	3245.76	3613.36
3.50	2236.84	2239.15	2245.25	2258.31	2283.72	2329.52	2406.38	2526.62	2702.30	2942.32	3249.30	3617.30
3.60	2239.29	2241.60	2247.70	2260.78	2286.21	2332.07	2409.01	2529.38	2705.26	2945.54	3252.86	3621.27
3.70	2241.75	2244.07	2250.18	2263.26	2288.73	2334.64	2411.66	2532.17	2708.24	2948.78	3256.44	3625.26
3.80	2244.22	2246.54	2252.65	2265.75	2291.25	2337.21	2414.31	2534.96	2711.22	2952.04	3260.03	3629.26
3.90	2246.69	2249.01	2255.14	2268.25	2293.77	2339.78	2416.97	2537.75	2714.21	2955.29	3263.63	3633.27
4.00	2249.16	2251.48	2257.61	2270.74	2296.29	2342.35	2419.63	2540.54	2717.20	2958.54	3267.22	3637.27
4.10	2251.62	2253.95	2260.08	2273.23	2298.81	2344.92	2422.28	2543.32	2720.17	2961.79	3270.81	3641.26
4.20	2254.07	2256.40	2262.54	2275.70	2301.30	2347.46	2424.91	2546.08	2723.13	2965.01	3274.37	3645.23
4.30	2256.49	2258.82	2264.97	2278.14	2303.78	2349.99	2427.52	2548.82	2726.06	2968.20	3277.90	3649.16
4.40	2258.89	2261.22	2267.38	2280.56	2306.22	2352.48	2430.10	2551.53	2728.96	2971.36	3281.38	3653.05
4.50	2261.25	2263.58	2269.75	2282.95	2308.64	2354.94	2432.64	2554.20	2731.81	2974.47	3284.82	3656.88
4.60	2263.57	2265.91	2272.07	2285.29	2311.00	2357.36	2435.14	2556.82	2734.62	2977.52	3288.20	3660.65
4.70	2265.84	2268.18	2274.35	2287.58	2313.32	2359.72	2437.58	2559.39	2737.37	2980.52	3291.51	3664.34
4.80	2268.05	2270.39	2276.57	2289.82	2315.58	2362.03	2439.96	2561.89	2740.05	2983.44	3294.74	3667.93
4.90	2270.20	2272.55	2278.73	2291.99	2317.78	2364.27	2442.28	2564.32	2742.65	2986.27	3297.87	3671.42
5.00	2272.28	2274.62	2280.82	2294.08	2319.90	2366.43	2444.51	2566.67	2745.16	2989.01	3300.90	3674.80
5.10	2274.27	2276.62	2282.82	2296.10	2321.94	2368.52	2446.66	2568.93	2747.58	2991.64	3303.81	3678.05
5.20	2276.18	2278.53	2284.74	2298.03	2323.89	2370.50	2448.72	2571.09	2749.89	2994.16	3306.59	3681.15
5.30	2277.99	2280.35	2286.56	2299.85	2325.74	2372.39	2450.67	2573.14	2752.08	2996.55	3309.23	3684.10
5.40	2279.70	2282.05	2288.27	2301.58	2327.48	2374.17	2452.50	2575.07	2754.14	2998.80	3311.72	3686.87
5.50	2281.29	2283.65	2289.86	2303.18	2329.10	2375.82	2454.22	2576.87	2756.07	3000.90	3314.05	3689.46
5.60	2282.75	2285.11	2291.33	2304.66	2330.60	2377.35	2455.79	2578.52	2757.85	3002.84	3316.19	3691.85
5.70	2284.09	2286.45	2292.67	2306.01	2331.96	2378.74	2457.23	2580.03	2759.46	3004.60	3318.14	3694.03

Continuación del apéndice 1.

5.80	2285.28	2287.64	2293.87	2307.21	2333.18	2379.98	2458.51	2581.38	2760.91	3006.17	3319.88	3695.97
5.90	2286.32	2288.68	2294.91	2308.26	2334.24	2381.06	2459.63	2582.56	2762.16	3007.55	3321.40	3697.67
6.00	2287.19	2289.55	2295.79	2309.14	2335.13	2381.98	2460.58	2583.55	2763.23	3008.71	3322.68	3699.11
6.10	2287.90	2290.26	2296.50	2309.85	2335.85	2382.71	2461.34	2584.35	2764.09	3009.64	3323.72	3700.26
6.20	2288.42	2290.78	2297.02	2310.38	2336.38	2383.26	2461.90	2584.94	2764.72	3010.34	3324.49	3701.13
6.30	2288.75	2291.11	2297.35	2310.72	2336.72	2383.60	2462.26	2585.32	2765.13	3010.78	3324.99	3701.69
6.40	2288.88	2291.24	2297.48	2310.85	2336.86	2383.74	2462.40	2585.47	2765.29	3010.97	3325.19	3701.92
6.50	2288.80	2291.16	2297.40	2310.77	2336.77	2383.66	2462.32	2585.38	2765.20	3010.87	3325.09	3701.81
6.60	2288.49	2290.86	2297.10	2310.46	2336.47	2383.34	2461.99	2585.05	2764.84	3010.48	3324.66	3701.34
6.70	2287.96	2290.33	2296.56	2309.92	2335.92	2382.79	2461.42	2584.45	2764.20	3009.79	3323.90	3700.50
6.80	2287.19	2289.55	2295.79	2309.14	2335.13	2381.99	2460.59	2583.58	2763.28	3008.78	3322.79	3699.27
6.90	2286.16	2288.52	2294.76	2308.11	2334.09	2380.92	2459.49	2582.43	2762.04	3007.44	3321.32	3697.63
6.98	2285.16	2287.52	2293.75	2307.09	2333.06	2379.87	2458.41	2581.29	2760.83	3006.13	3319.87	3696.02
6.99	2285.02	2287.38	2293.61	2306.95	2332.92	2379.73	2458.26	2581.14	2760.67	3005.94	3319.67	3695.80
7.00	2284.88	2287.24	2293.47	2306.81	2332.78	2379.58	2458.11	2580.98	2760.50	3005.76	3319.47	3695.57
7.10	2283.32	2285.68	2291.91	2305.24	2331.19	2377.97	2456.44	2579.23	2758.63	3003.73	3317.22	3693.08
7.20	2281.49	2283.85	2290.07	2303.39	2329.32	2376.06	2454.48	2577.16	2756.42	3001.33	3314.58	3690.14
7.30	2279.37	2281.73	2287.94	2301.25	2327.16	2373.86	2452.20	2574.77	2753.87	2998.55	3311.51	3686.73
7.40	2276.96	2279.31	2285.52	2298.82	2324.69	2371.34	2449.60	2572.05	2750.96	2995.38	3308.01	3682.84
7.50	2274.24	2276.59	2282.79	2296.07	2321.92	2368.51	2446.68	2568.98	2747.68	2991.81	3304.08	3678.46
7.60	2271.20	2273.55	2279.74	2293.01	2318.82	2365.36	2443.42	2565.56	2744.02	2987.83	3299.68	3673.57
7.70	2267.85	2270.20	2276.38	2289.63	2315.40	2361.87	2439.82	2561.78	2739.98	2983.43	3294.83	3668.17
7.80	2264.17	2266.51	2272.69	2285.91	2311.65	2358.04	2435.86	2557.63	2735.54	2978.60	3289.50	3662.24
7.90	2260.16	2262.50	2268.66	2281.86	2307.55	2353.86	2431.55	2553.10	2730.70	2973.33	3283.68	3655.76
8.00	2255.81	2258.14	2264.29	2277.47	2303.11	2349.33	2426.87	2548.19	2725.45	2967.62	3277.37	3648.74
8.30	2240.66	2242.98	2249.09	2262.18	2287.65	2333.56	2410.59	2531.10	2707.17	2947.71	3255.39	3624.28
8.40	2234.90	2237.21	2243.31	2256.37	2281.77	2327.57	2404.39	2524.59	2700.21	2940.14	3247.03	3614.97
8.50	2228.81	2231.11	2237.19	2250.21	2275.54	2321.21	2397.82	2517.69	2692.83	2932.10	3238.15	3605.08
8.60	2222.71	2224.99	2231.02	2243.96	2269.16	2314.65	2391.00	2510.48	2685.08	2923.64	3228.78	3594.63
8.70	2220.37	2222.43	2227.99	2240.28	2264.77	2309.51	2385.12	2503.83	2677.60	2915.20	3219.23	3583.81
8.80	2252.21	2251.79	2252.87	2259.57	2278.22	2317.59	2388.64	2503.67	2674.47	2909.59	3211.39	3573.80
8.90	2495.81	2475.82	2444.96	2413.70	2394.52	2400.51	2444.71	2539.56	2695.77	2920.36	3214.22	3570.15
9.00	3700.56	3566.99	3364.44	3139.13	2934.75	2784.05	2707.24	2714.76	2810.53	2993.68	3258.13	3591.51
9.10	8167.94	7520.58	6596.38	5605.10	4713.21	4013.71	3534.84	3264.96	3175.56	3235.02	3413.25	3681.29
9.20	21171.94	18537.41	15093.71	11703.26	8877.05	6776.67	5351.40	4467.13	3982.73	3781.52	3776.04	3901.53
9.30	52754.70	42329.18	31017.68	21744.67	15111.04	10705.98	7914.87	6210.00	5208.58	4654.13	4381.14	4282.38
9.40	122890.14	74279.66	44187.89	27561.87	18229.11	12818.47	9591.59	7620.44	6389.61	5604.59	5093.08	4750.45
9.50	64011.09	31972.37	21278.21	15920.35	12697.21	10541.61	8996.24	7832.46	6923.28	6192.49	5591.64	5088.42

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Campo eléctrico bajo una línea de transmisión de 230 kV por medio del método numérico

ALTURA/ SERVIDUMBRE	-6.00	-5.50	-5.00	-4.50	-4.00	-3.50	-3.00	-2.50	-2.00	-1.50	-1.00	-0.50	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	2172.87	1631.13	1303.43	1101.35	976.02	899.11	852.98	826.17	811.16	803.09	798.95	796.96	796.17
0.20	3029.20	2528.67	2156.14	1892.39	1713.34	1596.58	1523.53	1479.73	1454.62	1440.86	1433.69	1430.20	1428.80
0.30	3354.13	2934.35	2595.89	2338.81	2154.05	2028.09	1946.50	1896.24	1866.78	1850.35	1841.66	1837.37	1835.63
0.40	3480.37	3103.21	2791.64	2548.93	2370.32	2245.95	2163.91	2112.57	2082.08	2064.87	2055.67	2051.10	2049.22
0.50	3526.24	3166.40	2867.40	2632.89	2459.07	2337.18	2256.23	2205.27	2174.81	2157.54	2148.26	2143.63	2141.72
0.60	3541.42	3187.40	2892.95	2661.69	2490.00	2369.41	2289.17	2238.56	2208.27	2191.07	2181.81	2177.17	2175.26
0.70	3546.35	3193.94	2900.79	2670.51	2499.52	2379.37	2299.41	2248.96	2218.75	2201.59	2192.34	2187.71	2185.80
0.80	3548.41	3196.30	2903.42	2673.34	2502.50	2382.46	2302.56	2252.15	2221.96	2204.81	2195.57	2190.94	2189.04
0.90	3549.87	3197.73	2904.81	2674.72	2503.86	2383.81	2303.91	2253.49	2223.30	2206.15	2196.91	2192.28	2190.37
1.00	3551.31	3199.04	2906.03	2675.86	2504.94	2384.85	2304.92	2254.49	2224.29	2207.12	2197.88	2193.26	2191.35
1.20	3554.55	3201.97	2908.69	2678.31	2507.24	2387.04	2307.04	2256.56	2226.34	2209.16	2199.91	2195.28	2193.36
1.30	3556.38	3203.62	2910.18	2679.68	2508.53	2388.26	2308.22	2257.72	2227.48	2210.29	2201.04	2196.40	2194.49
1.40	3558.35	3205.38	2911.79	2681.16	2509.91	2389.58	2309.50	2258.96	2228.71	2211.51	2202.25	2197.62	2195.70
1.50	3560.44	3207.27	2913.50	2682.74	2511.39	2390.99	2310.86	2260.30	2230.02	2212.81	2203.55	2198.91	2197.00
1.60	3562.68	3209.28	2915.33	2684.42	2512.96	2392.48	2312.30	2261.71	2231.42	2214.20	2204.93	2200.29	2198.37
1.70	3565.03	3211.41	2917.25	2686.19	2514.62	2394.07	2313.83	2263.20	2232.89	2215.66	2206.39	2201.74	2199.82
1.80	3567.52	3213.64	2919.29	2688.06	2516.37	2395.73	2315.44	2264.78	2234.45	2217.20	2207.92	2203.27	2201.36
1.90	3570.13	3215.99	2921.42	2690.03	2518.21	2397.48	2317.13	2266.43	2236.08	2218.82	2209.53	2204.88	2202.96
2.00	3572.86	3218.45	2923.65	2692.08	2520.13	2399.31	2318.90	2268.16	2237.78	2220.52	2211.22	2206.56	2204.64
2.10	3575.70	3221.01	2925.97	2694.22	2522.13	2401.22	2320.74	2269.96	2239.56	2222.28	2212.98	2208.32	2206.40
2.20	3578.65	3223.67	2928.39	2696.44	2524.21	2403.20	2322.66	2271.84	2241.41	2224.11	2214.80	2210.14	2208.22
2.30	3581.72	3226.43	2930.89	2698.75	2526.37	2405.25	2324.64	2273.78	2243.33	2226.02	2216.70	2212.03	2210.10
2.40	3584.89	3229.28	2933.48	2701.13	2528.60	2407.38	2326.69	2275.79	2245.31	2227.98	2218.65	2213.98	2212.05
2.50	3588.15	3232.22	2936.15	2703.59	2530.90	2409.57	2328.81	2277.86	2247.35	2230.01	2220.67	2216.00	2214.07
2.60	3591.51	3235.24	2938.90	2706.12	2533.27	2411.82	2330.99	2279.99	2249.45	2232.09	2222.75	2218.07	2216.14
2.70	3594.96	3238.35	2941.72	2708.71	2535.70	2414.13	2333.22	2282.17	2251.61	2234.23	2224.88	2220.20	2218.26
2.80	3598.50	3241.53	2944.61	2711.37	2538.19	2416.50	2335.51	2284.41	2253.81	2236.42	2227.06	2222.37	2220.44
2.90	3602.11	3244.78	2947.56	2714.09	2540.73	2418.92	2337.85	2286.70	2256.07	2238.66	2229.29	2224.60	2222.66
3.00	3605.79	3248.10	2950.57	2716.86	2543.32	2421.39	2340.24	2289.03	2258.38	2240.95	2231.57	2226.87	2224.93
3.10	3609.54	3251.48	2953.64	2719.68	2545.96	2423.90	2342.67	2291.41	2260.72	2243.28	2233.89	2229.18	2227.24
3.20	3613.35	3254.90	2956.75	2722.55	2548.65	2426.46	2345.14	2293.82	2263.10	2245.64	2236.24	2231.53	2229.59
3.30	3617.22	3258.38	2959.91	2725.46	2551.37	2429.05	2347.64	2296.27	2265.51	2248.03	2238.62	2233.91	2231.97
3.40	3621.12	3261.90	2963.10	2728.40	2554.12	2431.66	2350.17	2298.75	2267.96	2250.46	2241.04	2236.32	2234.37
3.50	3625.07	3265.45	2966.33	2731.36	2556.90	2434.31	2352.72	2301.25	2270.42	2252.90	2243.47	2238.75	2236.80
3.60	3629.05	3269.03	2969.58	2734.36	2559.70	2436.97	2355.30	2303.76	2272.91	2255.37	2245.93	2241.20	2239.25
3.70	3633.05	3272.63	2972.84	2737.36	2562.51	2439.65	2357.89	2306.30	2275.41	2257.85	2248.40	2243.66	2241.71
3.80	3637.06	3276.24	2976.12	2740.38	2565.33	2442.34	2360.49	2308.84	2277.91	2260.34	2250.87	2246.13	2244.18
3.90	3641.08	3279.86	2979.41	2743.40	2568.16	2445.03	2363.09	2311.38	2280.42	2262.83	2253.35	2248.61	2246.65
4.00	3645.09	3283.47	2982.68	2746.42	2570.99	2447.72	2365.68	2313.92	2282.93	2265.31	2255.83	2251.08	2249.12
4.10	3649.09	3287.07	2985.95	2749.43	2573.80	2450.40	2368.27	2316.45	2285.43	2267.79	2258.30	2253.54	2251.58
4.20	3653.07	3290.65	2989.20	2752.42	2576.60	2453.06	2370.84	2318.97	2287.91	2270.25	2260.75	2255.99	2254.03
4.30	3657.01	3294.20	2992.42	2755.38	2579.37	2455.70	2373.39	2321.46	2290.37	2272.69	2263.18	2258.42	2256.45
4.40	3660.90	3297.70	2995.60	2758.31	2582.11	2458.31	2375.92	2323.93	2292.80	2275.11	2265.58	2260.81	2258.85
4.50	3664.74	3301.16	2998.74	2761.19	2584.81	2460.88	2378.40	2326.36	2295.20	2277.49	2267.95	2263.18	2261.21
4.60	3668.52	3304.55	3001.82	2764.03	2587.46	2463.40	2380.84	2328.74	2297.55	2279.82	2270.28	2265.50	2263.53
4.70	3672.21	3307.88	3004.84	2766.81	2590.06	2465.88	2383.23	2331.08	2299.86	2282.11	2272.56	2267.77	2265.80
4.80	3675.82	3311.12	3007.78	2769.51	2592.59	2468.29	2385.56	2333.36	2302.10	2284.34	2274.78	2269.99	2268.01
4.90	3679.32	3314.27	3010.64	2772.14	2595.05	2470.63	2387.82	2335.57	2304.29	2286.50	2276.93	2272.14	2270.16
5.00	3682.70	3317.31	3013.40	2774.68	2597.43	2472.89	2390.01	2337.71	2306.39	2288.60	2279.01	2274.22	2272.24
5.10	3686.05	3320.24	3016.06	2777.13	2599.72	2475.07	2392.11	2339.76	2308.42	2290.61	2281.02	2276.22	2274.23
5.20	3689.06	3323.04	3018.59	2779.46	2601.90	2477.14	2394.12	2341.73	2310.36	2292.53	2282.93	2278.12	2276.14
5.30	3692.02	3325.69	3021.00	2781.68	2603.98	2479.12	2396.02	2343.59	2312.20	2294.35	2284.75	2279.94	2277.95
5.40	3694.80	3328.19	3023.27	2783.77	2605.93	2480.97	2397.82	2345.34	2313.93	2296.07	2286.46	2281.64	2279.66
5.50	3697.39	3330.53	3025.39	2785.71	2607.75	2482.71	2399.49	2346.98	2315.54	2297.67	2288.05	2283.24	2281.25
5.60	3699.79	3332.68	3027.34	2787.51	2609.43	2484.30	2401.03	2348.49	2317.03	2299.15	2289.52	2284.70	2282.71
5.70	3701.97	3334.64	3029.12	2789.14	2610.96	2485.76	2402.44	2349.86	2318.38	2300.49	2290.86	2286.04	2284.05
5.80	3703.92	3336.39	3030.71	2790.60	2612.32	2487.06	2403.69	2351.09	2319.59	2301.69	2292.05	2287.23	2285.24
5.90	3705.62	3337.92	3032.09	2791.87	2613.51	2488.19	2404.78	2352.16	2320.65	2302.74	2293.09	2288.27	2286.27
6.00	3707.06	3339.21	3033.26	2792.95	2614.51	2489.14	2405.70	2353.06	2321.54	2303.62	2293.97	2289.14	2287.15
6.10	3708.22	3340.25	3034.20	2793.82	2615.32	2489.91	2406.45	2353.78	2322.25	2304.33	2294.68	2289.85	2287.85
6.20	3709.09	3341.03	3034.91	2794.46	2615.93	2490.48	2407.00	2354.32	2322.78	2304.85	2295.20	2290.37	2288.38
6.30	3709.65	3341.53	3035.36	2794.87	2616.31	2490.85	2407.35	2354.66	2323.12	2305.19	2295.54	2290.70	2288.71
6.40	3709.88	3341.73	3035.54	2795.04	2616.46	2490.99	2407.49	2354.80	2323.25	2305.32	2295.67	2290.83	2288.84
6.50	3709.77	3341.63	3035.44	2794.94	2616.37	2490.91	2407.40	2354.72	2323.17	2305.24	2295.58	2290.75	2288.76
6.60	3709.30	3341.20	3035.05	2794.58	2616.03	2490.58	2407.09	2354.41	2322.86	2304.93	2295.28	2290.45	2288.45
6.70	3708.46	3340.44	3034.35	2793.94	2615.43	2490.00	2406.53	2353.86	2322.32	2304.40	2294.75	2289.91	2287.92
6.80	3707.22	3339.32	3033.34	2793.00	2614.55	2489.16	2405.72	2353.06	2321.54	2303.62	2293.97	2289.14	2287.14
6.90	3705.58	3337.84	3031.99	2791.75	2613.38	2488.05	2404.64	2352.01	2320.50	2302.59	2292.94	2288.11	2286.12
7.00	3703.52	3335.98	3030.29	2790.19	2611.92	2486.66	2403.29	2350.69	2319.19	2301.29	2291.65	2286.83	2284.84
7.10	3701.02	3333.73	3028.24	2788.30	2610.15	2484.97	2401.66	2349.09	2317.62	2299.73	2290.10	2285.27	2283.28
7.20	3698.07	3331.07	3025.82	2786.07	2608.06	2482.98	2399.73	2					

Continuación del apéndice 2.

7.70	3676.06	3311.22	3007.78	2769.45	2592.49	2468.15	2385.40	2333.18	2301.92	2284.15	2274.58	2269.79	2267.81
8.10	3648.99	3286.83	2985.62	2749.04	2573.37	2449.95	2367.80	2315.97	2284.93	2267.29	2257.79	2253.03	2251.07
8.20	3640.82	3279.47	2978.93	2742.88	2567.61	2444.46	2362.49	2310.78	2279.81	2262.21	2252.73	2247.98	2246.02
8.30	3632.08	3271.59	2971.78	2736.29	2561.44	2438.58	2356.81	2305.22	2274.33	2256.77	2247.31	2242.58	2240.62
8.40	3622.75	3263.19	2964.14	2729.26	2554.86	2432.32	2350.76	2299.29	2268.48	2250.96	2241.53	2236.81	2234.86
8.50	3612.84	3254.26	2956.03	2721.79	2547.87	2425.66	2344.33	2293.01	2262.28	2244.81	2235.41	2230.71	2228.76
8.60	3602.35	3244.83	2947.48	2713.93	2540.52	2418.69	2337.62	2286.48	2255.89	2238.53	2229.21	2224.56	2222.65
8.70	3591.40	3235.06	2938.72	2706.01	2533.30	2412.08	2331.59	2281.08	2251.16	2234.51	2225.88	2221.80	2220.25
8.80	3580.74	3226.17	2931.53	2700.57	2529.87	2411.21	2334.14	2288.09	2263.63	2253.04	2250.28	2250.91	2252.01
8.90	3574.25	3224.39	2935.23	2711.40	2550.85	2447.16	2391.65	2374.81	2386.54	2416.01	2451.61	2482.04	2498.28
9.00	3586.63	3253.57	2985.84	2792.43	2678.07	2645.09	2693.93	2820.80	3012.85	3243.37	3471.14	3647.50	3730.60
9.10	3656.94	3376.56	3177.52	3083.87	3124.05	3333.22	3749.25	4398.23	5268.42	6280.51	7273.68	8032.15	8359.58
9.20	3850.97	3695.78	3656.77	3792.06	4187.46	4966.00	6284.67	8301.93	11096.19	14528.87	18098.20	20931.10	22097.73
9.30	4217.86	4277.13	4493.09	4966.09	5860.49	7440.58	10107.86	14418.22	21018.24	30344.97	41807.73	52469.27	57127.88
9.40	4705.82	5020.79	5493.02	6222.98	7382.52	9271.55	12417.82	17767.75	27080.34	43743.49	73935.98	122702.29	157923.58
9.41	4754.88	5094.02	5586.58	6328.53	7484.02	9340.50	12408.56	17620.61	26767.35	43513.03	75435.42	132434.54	179240.51
9.42	4803.03	5165.68	5677.15	6428.04	7573.06	9383.66	12345.80	17361.09	26212.64	42754.86	75919.84	142074.10	205819.94
9.43	4849.99	5235.42	5764.32	6521.08	7649.25	9400.87	12229.68	16988.84	25409.14	41418.01	75101.00	150887.68	240216.64
9.44	4895.47	5302.89	5847.70	6607.26	7712.39	9392.37	12061.35	16506.13	24356.73	39468.35	72682.00	157589.80	287104.69
9.45	4939.21	5367.73	5926.91	6686.27	7762.43	9358.83	11843.01	15917.98	23063.26	36895.59	68397.73	160075.40	356139.90
9.46	4980.90	5429.62	6001.60	6757.86	7799.51	9301.30	11577.86	15232.13	21545.04	33719.68	62075.13	155215.37	470742.72
9.47	5020.26	5488.23	6071.46	6821.86	7823.89	9221.23	11270.03	14458.99	19826.91	29994.99	53706.77	139089.61	699459.52
9.48	5057.00	5543.24	6136.19	6878.16	7836.00	9120.37	10924.51	13611.28	17941.60	25811.10	43517.15	108431.81	1283207.36
9.49	5090.85	5594.35	6195.53	6926.71	7836.39	9000.79	10546.97	12703.68	15928.45	21288.87	31987.56	64031.96	3203348.26
9.50	5088.42	5591.64	6192.49	6923.28	7832.46	8996.24	10541.61	12697.21	15920.35	21278.21	31972.37	64011.09	

ALTURA/ SERVIDUMBRE	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	796.21	797.23	799.97	806.09	818.59	842.55	885.95	960.85	1085.52	1288.65	1619.05	2164.63
0.20	1428.86	1430.63	1435.36	1445.72	1466.55	1505.55	1574.12	1687.77	1866.09	2132.03	2509.45	3016.54
0.30	1835.69	1837.83	1843.50	1855.79	1880.09	1924.70	2001.16	2123.83	2308.32	2568.69	2913.49	3341.19
0.40	2049.27	2051.52	2057.48	2070.29	2095.38	2140.90	2217.84	2339.22	2518.17	2764.99	3083.69	3469.18
0.50	2141.76	2144.03	2150.02	2162.87	2187.92	2233.16	2309.21	2428.46	2603.08	2842.18	3148.67	3516.85
0.60	2175.30	2177.56	2183.54	2196.35	2221.30	2266.27	2341.77	2459.93	2632.66	2868.75	3170.83	3533.12
0.70	2185.84	2188.11	2194.08	2206.87	2231.76	2276.63	2351.93	2469.74	2641.87	2877.06	3177.88	3538.52
0.80	2189.08	2191.34	2197.31	2210.09	2234.98	2279.83	2355.08	2472.82	2644.84	2879.85	3180.42	3540.74
0.90	2190.41	2192.68	2198.65	2211.43	2236.32	2281.18	2356.45	2474.20	2646.25	2881.29	3181.89	3542.24
1.00	2191.39	2193.65	2199.62	2212.42	2237.31	2282.19	2357.48	2475.28	2647.38	2882.51	3183.22	3543.69
1.20	2193.40	2195.67	2201.65	2214.45	2239.37	2284.29	2359.65	2477.55	2649.81	2885.15	3186.13	3546.93
1.30	2194.53	2196.80	2202.78	2215.59	2240.52	2285.46	2360.86	2478.82	2651.17	2886.63	3187.77	3548.76
1.40	2195.74	2198.01	2203.99	2216.81	2241.76	2286.72	2362.16	2480.19	2652.64	2888.22	3189.53	3550.72
1.50	2197.04	2199.31	2205.29	2218.12	2243.08	2288.07	2363.55	2481.65	2654.20	2889.92	3191.41	3552.81
1.60	2198.41	2200.68	2206.67	2219.51	2244.48	2289.50	2365.03	2483.20	2655.86	2891.73	3193.41	3555.04
1.70	2199.86	2202.14	2208.13	2220.97	2245.96	2291.01	2366.59	2484.85	2657.62	2893.65	3195.52	3557.39
1.80	2201.40	2203.67	2209.67	2222.52	2247.53	2292.61	2368.24	2486.57	2659.47	2895.66	3197.74	3559.87
1.90	2203.00	2205.28	2211.28	2224.14	2249.17	2294.28	2369.97	2488.39	2661.41	2897.78	3200.08	3562.47
2.00	2204.68	2206.96	2212.97	2225.84	2250.88	2296.03	2371.78	2490.29	2663.44	2899.99	3202.52	3565.20
2.10	2206.44	2208.72	2214.73	2227.61	2252.67	2297.86	2373.66	2492.27	2665.56	2902.29	3205.07	3568.03
2.20	2208.26	2210.54	2216.56	2229.45	2254.53	2299.75	2375.62	2494.32	2667.76	2904.69	3207.72	3570.98
2.30	2210.14	2212.43	2218.45	2231.35	2256.46	2301.72	2377.65	2496.46	2670.04	2907.17	3210.46	3574.04
2.40	2212.10	2214.38	2220.41	2233.32	2258.45	2303.75	2379.75	2498.66	2672.39	2909.74	3213.30	3577.20
2.50	2214.11	2216.39	2222.43	2235.35	2260.51	2305.85	2381.92	2500.93	2674.83	2912.39	3216.23	3580.46
2.60	2216.18	2218.47	2224.51	2237.44	2262.62	2308.00	2384.14	2503.27	2677.33	2915.11	3219.24	3583.81
2.70	2218.30	2220.59	2226.64	2239.59	2264.79	2310.21	2386.43	2505.67	2679.90	2917.91	3222.33	3587.25
2.80	2220.48	2222.77	2228.82	2241.79	2267.01	2312.48	2388.77	2508.13	2682.53	2920.78	3225.49	3590.78
2.90	2222.70	2225.00	2231.06	2244.03	2269.28	2314.80	2391.16	2510.64	2685.21	2923.70	3228.73	3594.38
3.00	2224.97	2227.27	2233.33	2246.32	2271.60	2317.16	2393.60	2513.21	2687.96	2926.69	3232.03	3598.06
3.10	2227.28	2229.58	2235.65	2248.65	2273.96	2319.57	2396.09	2515.82	2690.75	2929.73	3235.39	3601.80
3.20	2229.63	2231.93	2238.01	2251.02	2276.35	2322.01	2398.61	2518.47	2693.58	2932.82	3238.80	3605.61
3.30	2232.01	2234.31	2240.39	2253.42	2278.78	2324.49	2401.17	2521.15	2696.46	2935.95	3242.26	3609.46
3.40	2234.41	2236.72	2242.81	2255.85	2281.24	2326.99	2403.76	2523.87	2699.37	2939.12	3245.76	3613.36
3.50	2236.84	2239.15	2245.25	2258.31	2283.72	2329.52	2406.38	2526.62	2702.30	2942.32	3249.30	3617.30
3.60	2239.29	2241.60	2247.70	2260.78	2286.21	2332.07	2409.01	2529.38	2705.26	2945.54	3252.86	3621.27
3.70	2241.75	2244.07	2250.18	2263.26	2288.73	2334.64	2411.66	2532.17	2708.24	2948.78	3256.44	3625.26
3.80	2244.22	2246.54	2252.65	2265.75	2291.25	2337.21	2414.31	2534.96	2711.22	2952.04	3260.03	3629.26
3.90	2246.69	2249.01	2255.14	2268.25	2293.77	2339.78	2416.97	2537.75	2714.21	2955.29	3263.63	3633.27
4.00	2249.16	2251.48	2257.61	2270.74	2296.29	2342.35	2419.63	2540.54	2717.20	2958.54	3267.22	3637.27
4.10	2251.62	2253.95	2260.08	2273.23	2298.81	2344.92	2422.28	2543.32	2720.17	2961.79	3270.81	3641.26
4.20	2254.07	2256.40	2262.54	2276.30	2301.30	2347.46	2424.91	2546.08	2723.13	2965.01	3274.37	3645.23
4.30	2256.49	2258.82	2264.97	2279.14	2303.78	2349.99	2427.52	2548.82	2726.06	2968.20	3277.90	3649.16
4.40	2258.89	2261.22	2267.38	2282.56	2306.22	2352.48	2430.10	2551.53	2728.96	2971.36	3281.38	3653.05
4.50	2261.25	2263.58	2269.75	2285.29	2308.64	2354.94	2432.64	2554.20	2731.81	2974.47	3284.82	3656.88
4.60	2263.57	2265.91	2272.07	2288.29	2311.00	2357.36	2435.14	2556.82	2734.62	2977.52	3288.20	3660.65
4.70	2265.84	2268.18	2274.35	2287.58	2313.32	2359.72	2437.58	2559.39	2737.37	2980.52	3291.51	3664.34

Continuación del apéndice 2.

4.80	2268.05	2270.39	2276.57	2289.82	2315.58	2362.03	2439.96	2561.89	2740.05	2983.44	3294.74	3667.93
4.90	2270.20	2272.55	2278.73	2291.99	2317.78	2364.27	2442.28	2564.32	2742.65	2986.27	3297.87	3671.42
5.00	2272.28	2274.62	2280.82	2294.08	2319.90	2366.43	2444.51	2566.67	2745.16	2989.01	3300.90	3674.80
5.10	2274.27	2276.62	2282.82	2296.10	2321.94	2368.52	2446.66	2568.93	2747.58	2991.64	3303.81	3678.05
5.20	2276.18	2278.53	2284.74	2298.03	2323.89	2370.50	2448.72	2571.09	2749.89	2994.16	3306.59	3681.15
5.30	2277.99	2280.35	2286.56	2299.85	2325.74	2372.39	2450.67	2573.14	2752.08	2996.55	3309.23	3684.10
5.40	2279.70	2282.05	2288.27	2301.58	2327.48	2374.17	2452.50	2575.07	2754.14	2998.80	3311.72	3686.87
5.50	2281.29	2283.65	2289.86	2303.18	2329.10	2375.82	2454.22	2576.87	2756.07	3000.90	3314.05	3689.46
5.60	2282.75	2285.11	2291.33	2304.66	2330.60	2377.35	2455.79	2578.52	2757.85	3002.84	3316.19	3691.85
5.70	2284.09	2286.45	2292.67	2306.01	2331.96	2378.74	2457.23	2580.03	2759.46	3004.60	3318.14	3694.03
5.80	2285.28	2287.64	2293.87	2307.21	2333.18	2379.98	2458.51	2581.38	2760.91	3006.17	3319.88	3695.97
5.90	2286.32	2288.68	2294.91	2308.26	2334.24	2381.06	2459.63	2582.56	2762.16	3007.55	3321.40	3697.67
6.00	2287.19	2289.55	2295.79	2309.14	2335.13	2381.98	2460.58	2583.55	2763.23	3008.71	3322.68	3699.11
6.10	2287.90	2290.26	2296.50	2309.85	2335.85	2382.71	2461.34	2584.35	2764.09	3009.64	3323.72	3700.26
6.20	2288.42	2290.78	2297.02	2310.38	2336.38	2383.26	2461.90	2584.94	2764.72	3010.34	3324.49	3701.13
6.30	2288.75	2291.11	2297.35	2310.72	2336.72	2383.60	2462.26	2585.32	2765.13	3010.78	3324.99	3701.69
6.40	2288.88	2291.24	2297.48	2310.85	2336.86	2383.74	2462.40	2585.47	2765.29	3010.97	3325.19	3701.92
6.50	2288.80	2291.16	2297.40	2310.77	2336.77	2383.66	2462.32	2585.38	2765.20	3010.87	3325.09	3701.81
6.60	2288.49	2290.86	2297.10	2310.46	2336.47	2383.34	2461.99	2585.05	2764.84	3010.48	3324.66	3701.34
6.70	2287.96	2290.33	2296.56	2309.92	2335.92	2382.79	2461.42	2584.45	2764.20	3009.79	3323.90	3700.50
6.80	2287.19	2289.55	2295.79	2309.14	2335.13	2381.99	2460.59	2583.58	2763.28	3008.78	3322.79	3699.27
6.90	2286.16	2288.52	2294.76	2308.11	2334.09	2380.92	2459.49	2582.43	2762.04	3007.44	3321.32	3697.63
7.00	2284.88	2287.24	2293.47	2306.81	2332.78	2379.58	2458.11	2580.98	2760.50	3005.76	3319.47	3695.57
7.10	2283.32	2285.68	2291.91	2305.24	2331.19	2377.97	2456.44	2579.23	2758.63	3003.73	3317.22	3693.08
7.20	2281.49	2283.85	2290.07	2303.39	2329.32	2376.06	2454.48	2577.16	2756.42	3001.33	3314.58	3690.14
7.30	2279.37	2281.73	2287.94	2301.25	2327.16	2373.86	2452.20	2574.77	2753.87	2998.55	3311.51	3686.73
7.40	2276.96	2279.31	2285.52	2298.82	2324.69	2371.34	2449.60	2572.05	2750.96	2995.38	3308.01	3682.84
7.50	2274.24	2276.59	2282.79	2296.07	2321.92	2368.51	2446.68	2568.98	2747.68	2991.81	3304.08	3678.46
7.60	2271.20	2273.55	2279.74	2293.01	2318.82	2365.36	2443.42	2565.56	2744.02	2987.83	3299.68	3673.57
7.70	2267.85	2270.20	2276.38	2289.63	2315.40	2361.87	2439.82	2561.78	2739.98	2983.43	3294.83	3668.17
8.10	2251.11	2253.44	2259.58	2272.73	2298.32	2344.44	2421.82	2542.89	2719.78	2961.45	3270.55	3641.16
8.20	2246.06	2248.39	2254.51	2267.63	2293.16	2339.19	2416.40	2537.19	2713.69	2954.81	3263.23	3633.01
8.30	2240.66	2242.98	2249.09	2262.18	2287.65	2333.56	2410.59	2531.10	2707.17	2947.71	3255.39	3624.28
8.40	2234.90	2237.21	2243.31	2256.37	2281.77	2327.57	2404.39	2524.59	2700.21	2940.14	3247.03	3614.97
8.50	2228.81	2231.11	2237.19	2250.21	2275.54	2321.21	2397.82	2517.69	2692.83	2932.10	3238.15	3605.08
8.60	2222.71	2224.99	2231.02	2243.96	2269.16	2314.65	2391.00	2510.48	2685.08	2923.64	3228.78	3594.63
8.70	2220.37	2222.43	2227.99	2240.28	2264.77	2309.51	2385.12	2503.83	2677.60	2915.20	3219.23	3583.81
8.80	2252.21	2251.79	2252.87	2259.57	2278.22	2317.59	2388.64	2503.67	2674.47	2909.59	3211.39	3573.80
8.90	2495.81	2475.82	2444.96	2413.70	2394.52	2400.51	2444.71	2539.56	2695.77	2920.36	3214.22	3570.15
9.00	3700.56	3566.99	3364.44	3139.13	2934.75	2784.05	2707.24	2714.76	2810.53	2993.68	3258.13	3591.51
9.10	8167.94	7520.58	6596.38	5605.10	4713.21	4013.71	3534.84	3264.96	3175.56	3235.02	3413.25	3681.29
9.20	21171.94	18537.41	15093.71	11703.26	8877.05	6776.67	5351.40	4467.13	3982.73	3781.52	3776.04	3901.53
9.30	52754.70	42329.18	31017.68	21744.67	15111.04	10705.98	7914.87	6210.00	5208.58	4654.13	4381.14	4282.38
9.40	122890.14	74279.66	44187.89	27561.87	18229.11	12818.47	9591.59	7620.44	6389.61	5604.59	5093.08	4750.45
9.41	132604.69	75746.74	43915.69	27203.78	18038.91	12772.00	9631.00	7700.12	6479.99	5688.05	5159.79	4795.48
9.42	142225.43	76196.75	43113.09	26601.02	17733.48	12669.51	9642.55	7765.77	6563.21	5767.76	5224.43	4839.28
9.43	151019.19	75341.67	41729.41	25746.85	17312.77	12511.39	9626.29	7817.16	6638.93	5843.38	5286.69	4881.62
9.44	157700.63	72884.85	39730.87	24641.51	16779.39	12299.10	9582.72	7854.26	6706.89	5914.58	5346.27	4922.24
9.45	160164.84	68561.46	37107.53	23293.22	16138.71	12035.14	9512.74	7877.22	6766.93	5981.08	5402.89	4960.90
9.46	155282.87	62198.72	33879.68	21718.70	15398.88	11723.06	9417.67	7886.34	6818.92	6042.63	5456.26	4997.34
9.47	139134.79	53789.49	30102.10	19943.19	14570.68	11367.33	9299.24	7882.14	6862.85	6099.01	5506.12	5031.30
9.48	108454.43	43558.57	25864.74	17999.85	13667.25	10973.28	9159.50	7865.23	6898.74	6150.03	5552.23	5062.55
9.49	64031.96	31987.56	21288.87	15928.45	12703.68	10546.97	9000.79	7836.39	6926.71	6195.53	5594.35	5090.85
9.50	64011.09	31972.37	21278.21	15920.35	12697.21	10541.61	8996.24	7832.46	6923.28	6192.49	5591.64	5088.42

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Campo magnético bajo una línea de transmisión de 230 kV

Altura/ Servidumbre	-6.00	-5.50	-5.00	-4.50	-4.00	-3.50	-3.00	-2.50	-2.00	-1.50	-1.00	-0.50	0.00
0.00	12.83	11.81	11.15	11.98	12.77	13.50	14.16	14.74	15.23	15.62	15.90	16.07	16.13
0.10	12.95	11.93	11.25	12.11	12.91	13.66	14.34	14.94	15.44	15.83	16.12	16.30	16.36
0.20	13.08	12.04	11.36	12.23	13.06	13.83	14.52	15.13	15.65	16.05	16.35	16.53	16.59
0.30	13.21	12.16	11.47	12.36	13.21	14.00	14.71	15.34	15.86	16.28	16.58	16.77	16.83
0.40	13.34	12.27	11.58	12.49	13.36	14.17	14.90	15.54	16.08	16.51	16.82	17.01	17.07
0.50	13.48	12.39	11.69	12.63	13.52	14.35	15.10	15.75	16.31	16.74	17.06	17.26	17.32
0.60	13.61	12.51	11.80	12.76	13.68	14.53	15.29	15.97	16.53	16.98	17.31	17.51	17.58
0.70	13.75	12.63	11.91	12.90	13.84	14.71	15.50	16.19	16.77	17.23	17.56	17.77	17.83
0.80	13.88	12.75	12.03	13.04	14.00	14.89	15.70	16.41	17.01	17.48	17.82	18.03	18.10
0.90	14.03	12.88	12.14	13.18	14.16	15.08	15.91	16.64	17.25	17.73	18.09	18.30	18.37
1.00	14.17	13.00	12.26	13.32	14.33	15.27	16.12	16.87	17.50	17.99	18.35	18.57	18.65
1.10	14.31	13.13	12.38	13.47	14.50	15.47	16.34	17.11	17.75	18.26	18.63	18.85	18.93
1.20	14.46	13.26	12.49	13.61	14.68	15.67	16.57	17.35	18.01	18.53	18.91	19.14	19.22
1.30	14.61	13.39	12.61	13.76	14.86	15.87	16.79	17.60	18.27	18.81	19.20	19.43	19.51
1.40	14.76	13.52	12.73	13.91	15.04	16.08	17.02	17.85	18.54	19.09	19.49	19.73	19.81
1.50	14.91	13.65	12.86	14.07	15.22	16.29	17.26	18.11	18.82	19.38	19.79	20.03	20.12
1.60	15.07	13.78	12.98	14.22	15.41	16.51	17.50	18.37	19.10	19.68	20.09	20.35	20.43
1.70	15.23	13.92	13.11	14.38	15.60	16.73	17.75	18.64	19.39	19.98	20.41	20.66	20.75
1.80	15.39	14.06	13.23	14.54	15.79	16.95	18.00	18.91	19.68	20.29	20.72	20.99	21.08
1.90	15.55	14.20	13.36	14.70	15.99	17.18	18.25	19.19	19.98	20.60	21.05	21.32	21.41
2.00	15.72	14.34	13.49	14.87	16.19	17.41	18.52	19.48	20.29	20.92	21.38	21.66	21.75
2.10	15.88	14.48	13.62	15.04	16.39	17.65	18.78	19.77	20.60	21.25	21.72	22.01	22.10
2.20	16.06	14.63	13.75	15.21	16.60	17.89	19.06	20.07	20.92	21.59	22.07	22.36	22.46
2.30	16.23	14.78	13.88	15.38	16.81	18.14	19.34	20.38	21.25	21.93	22.43	22.72	22.82
2.40	16.41	14.92	14.01	15.56	17.03	18.39	19.62	20.69	21.58	22.28	22.79	23.09	23.20
2.50	16.59	15.08	14.15	15.73	17.25	18.65	19.91	21.01	21.93	22.64	23.16	23.47	23.58
2.60	16.77	15.23	14.29	15.92	17.47	18.92	20.21	21.34	22.28	23.01	23.54	23.86	23.96
2.70	16.96	15.38	14.42	16.10	17.70	19.19	20.52	21.67	22.63	23.39	23.93	24.25	24.36
2.80	17.15	15.54	14.56	16.29	17.94	19.46	20.83	22.02	23.00	23.77	24.32	24.66	24.77
2.90	17.35	15.70	14.70	16.48	18.18	19.75	21.15	22.37	23.38	24.17	24.73	25.07	25.18
3.00	17.54	15.86	14.84	16.67	18.42	20.03	21.48	22.73	23.76	24.57	25.14	25.49	25.61
3.10	17.75	16.02	14.99	16.87	18.67	20.33	21.82	23.10	24.15	24.98	25.57	25.92	26.04
3.20	17.95	16.19	15.13	17.07	18.92	20.63	22.16	23.47	24.56	25.40	26.00	26.36	26.48
3.30	18.16	16.36	15.27	17.28	19.19	20.94	22.51	23.86	24.97	25.83	26.44	26.81	26.93
3.40	18.38	16.53	15.42	17.49	19.45	21.26	22.87	24.26	25.39	26.27	26.90	27.27	27.39
3.50	18.60	16.71	15.57	17.70	19.72	21.59	23.24	24.66	25.82	26.72	27.36	27.74	27.87
3.60	18.82	16.88	15.72	17.91	20.00	21.92	23.63	25.08	26.26	27.18	27.83	28.22	28.35
3.70	19.05	17.06	15.87	18.14	20.29	22.27	24.02	25.50	26.72	27.65	28.32	28.71	28.84
3.80	19.29	17.24	16.02	18.36	20.58	22.62	24.42	25.94	27.18	28.14	28.81	29.21	29.34
3.90	19.53	17.43	16.17	18.59	20.89	22.98	24.83	26.39	27.66	28.63	29.31	29.72	29.85
4.00	19.78	17.62	16.33	18.83	21.19	23.35	25.25	26.85	28.15	29.14	29.83	30.24	30.38
4.10	20.04	17.81	16.49	19.07	21.51	23.74	25.69	27.33	28.65	29.65	30.36	30.77	30.91
4.20	20.30	18.01	16.64	19.31	21.84	24.13	26.13	27.81	29.16	30.18	30.90	31.32	31.46
4.30	20.57	18.21	16.80	19.56	22.17	24.54	26.59	28.31	29.68	30.72	31.45	31.87	32.01
4.40	20.85	18.41	16.96	19.82	22.52	24.96	27.07	28.83	30.22	31.28	32.01	32.44	32.58
4.50	21.13	18.62	17.13	20.09	22.87	25.39	27.56	29.35	30.78	31.85	32.59	33.02	33.16
4.60	21.43	18.84	17.29	20.36	23.24	25.83	28.06	29.90	31.34	32.43	33.17	33.61	33.75
4.70	21.73	19.06	17.46	20.64	23.62	26.29	28.58	30.45	31.93	33.02	33.77	34.21	34.35
4.80	22.05	19.28	17.62	20.92	24.01	26.77	29.12	31.03	32.52	33.63	34.38	34.82	34.97
4.90	22.38	19.51	17.79	21.22	24.42	27.26	29.67	31.62	33.13	34.25	35.01	35.45	35.59
5.00	22.72	19.74	17.96	21.52	24.84	27.77	30.24	32.23	33.76	34.89	35.65	36.09	36.23
5.10	23.07	19.99	18.14	21.84	25.27	28.30	30.83	32.86	34.41	35.54	36.30	36.73	36.88
5.20	23.44	20.24	18.31	22.16	25.73	28.85	31.44	33.50	35.07	36.20	36.96	37.39	37.54
5.30	23.82	20.49	18.49	22.50	26.20	29.42	32.08	34.17	35.75	36.88	37.63	38.07	38.21
5.40	24.22	20.76	18.67	22.84	26.69	30.01	32.73	34.86	36.44	37.57	38.32	38.75	38.89
5.50	24.63	21.04	18.85	23.20	27.20	30.63	33.41	35.56	37.16	38.28	39.03	39.44	39.58
5.60	25.07	21.32	19.04	23.58	27.73	31.27	34.12	36.30	37.89	39.01	39.74	40.15	40.28
5.70	25.53	21.62	19.23	23.97	28.29	31.94	34.85	37.05	38.65	39.75	40.47	40.87	41.00
5.80	26.01	21.93	19.42	24.38	28.88	32.64	35.61	37.83	39.42	40.51	41.21	41.60	41.72
5.90	26.52	22.25	19.61	24.81	29.49	33.38	36.40	38.63	40.21	41.28	41.96	42.33	42.45
6.00	27.06	22.59	19.81	25.27	30.14	34.15	37.22	39.46	41.02	42.07	42.72	43.08	43.20
6.10	27.63	22.94	20.02	25.74	30.82	34.95	38.08	40.32	41.86	42.87	43.50	43.84	43.95
6.20	28.23	23.31	20.22	26.24	31.54	35.80	38.97	41.20	42.71	43.69	44.29	44.61	44.71
6.30	28.88	23.71	20.44	26.77	32.31	36.69	39.90	42.12	43.58	44.52	45.08	45.38	45.48
6.40	29.56	24.12	20.66	27.34	33.12	37.63	40.87	43.06	44.48	45.37	45.89	46.17	46.25
6.50	30.30	24.57	20.88	27.94	33.99	38.62	41.88	44.03	45.40	46.23	46.71	46.96	47.04
6.60	31.09	25.04	21.12	28.59	34.91	39.67	42.94	45.04	46.34	47.10	47.54	47.76	47.82
6.70	31.94	25.55	21.36	29.28	35.90	40.78	44.04	46.08	47.29	47.99	48.37	48.56	48.62
6.80	32.86	26.09	21.61	30.02	36.96	41.95	45.19	47.15	48.27	48.89	49.22	49.37	49.42
6.90	33.86	26.68	21.88	30.83	38.10	43.19	46.39	48.25	49.27	49.80	50.07	50.18	50.22
7.00	34.94	27.33	22.15	31.71	39.33	44.51	47.65	49.39	50.29	50.73	50.92	51.00	51.02
7.10	36.12	28.03	22.45	32.67	40.66	45.91	48.96	50.56	51.33	51.66	51.78	51.82	51.83
7.20	37.42	28.81	22.76	33.73	42.10	47.41	50.33	51.76	52.38	52.60	52.65	52.64	52.63
7.30	38.84	29.67	23.09	34.90	43.67	48.99	51.75	52.99	53.45	53.55	53.51	53.46	53.44
7.40	40.41	30.62	23.46	36.20	45.38	50.68	53.24	54.26	54.53	54.50	54.38	54.28	54.24

Continuación del apéndice 3.

7.50	42.15	31.70	23.85	37.65	47.25	52.48	54.79	55.55	55.62	55.45	55.24	55.10	55.04
7.60	44.08	32.91	24.28	39.28	49.31	54.40	56.39	56.87	56.72	56.41	56.11	55.91	55.84
7.70	46.24	34.30	24.77	41.12	51.56	56.44	58.06	58.21	57.83	57.36	56.97	56.72	56.63
7.80	48.66	35.89	25.31	43.23	54.05	58.60	59.78	59.57	58.94	58.31	57.82	57.52	57.41
7.90	51.38	37.74	25.92	45.64	56.79	60.90	61.55	60.94	60.06	59.26	58.66	58.31	58.19
8.00	54.44	39.91	26.64	48.43	59.81	63.33	63.37	62.33	61.16	60.19	59.50	59.09	58.96
8.10	57.91	42.49	27.47	51.69	63.15	65.89	65.22	63.71	62.26	61.12	60.32	59.86	59.71
8.20	61.83	45.58	28.48	55.51	66.84	68.57	67.11	65.10	63.35	62.03	61.13	60.62	60.45
8.30	66.28	49.34	29.70	60.04	70.89	71.37	69.01	66.47	64.41	62.92	61.93	61.37	61.18
8.40	71.33	53.97	31.23	65.44	75.35	74.26	70.91	67.82	65.46	63.79	62.71	62.10	61.90
8.50	77.03	59.76	33.18	71.93	80.20	77.23	72.80	69.14	66.47	64.65	63.47	62.81	62.60
8.60	83.44	67.12	35.77	79.76	85.44	80.23	74.65	70.41	67.46	65.47	64.21	63.51	63.28
8.70	90.57	76.62	39.31	89.26	91.03	83.22	76.44	71.64	68.40	66.27	64.92	64.19	63.95
8.80	98.41	89.08	44.37	100.74	96.87	86.15	78.14	72.81	69.30	67.03	65.62	64.84	64.60
8.90	106.81	105.65	51.99	114.53	102.85	88.95	79.75	73.90	70.16	67.76	66.29	65.48	65.22
9.00	115.52	127.81	64.32	130.75	108.73	91.55	81.21	74.91	70.96	68.46	66.93	66.10	65.83
9.10	124.13	157.23	86.17	149.11	114.28	93.88	82.53	75.83	71.70	69.12	67.54	66.69	66.42
9.20	132.03	194.71	130.21	168.45	119.15	95.86	83.66	76.64	72.38	69.73	68.13	67.26	66.98
9.30	138.51	237.53	236.98	186.43	123.03	97.43	84.60	77.36	73.00	70.31	68.68	67.80	67.53
9.40	142.86	275.32	557.01	199.60	125.62	98.53	85.32	77.96	73.55	70.85	69.21	68.33	68.05
9.50	144.53	291.17	1090.31	204.61	126.69	99.13	85.83	78.45	74.04	71.34	69.71	68.83	68.55

Altura/ Servidumbre	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
0.00	16.07	15.90	15.62	15.23	14.74	14.16	13.50	12.77	11.98	11.15	10.29	9.42
0.10	16.30	16.12	15.83	15.44	14.94	14.34	13.66	12.91	12.11	11.25	10.37	9.48
0.20	16.53	16.35	16.05	15.65	15.13	14.52	13.83	13.06	12.23	11.36	10.46	9.55
0.30	16.77	16.58	16.28	15.86	15.34	14.71	14.00	13.21	12.36	11.47	10.55	9.61
0.40	17.01	16.82	16.51	16.08	15.54	14.90	14.17	13.36	12.49	11.58	10.63	9.68
0.50	17.26	17.06	16.74	16.31	15.75	15.10	14.35	13.52	12.63	11.69	10.72	9.74
0.60	17.51	17.31	16.98	16.53	15.97	15.29	14.53	13.68	12.76	11.80	10.81	9.81
0.70	17.77	17.56	17.23	16.77	16.19	15.50	14.71	13.84	12.90	11.91	10.90	9.87
0.80	18.03	17.82	17.48	17.01	16.41	15.70	14.89	14.00	13.04	12.03	10.99	9.93
0.90	18.30	18.09	17.73	17.25	16.64	15.91	15.08	14.16	13.18	12.14	11.07	10.00
1.00	18.57	18.35	17.99	17.50	16.87	16.12	15.27	14.33	13.32	12.26	11.16	10.06
1.10	18.85	18.63	18.26	17.75	17.11	16.34	15.47	14.50	13.47	12.38	11.25	10.12
1.20	19.14	18.91	18.53	18.01	17.35	16.57	15.67	14.68	13.61	12.49	11.34	10.19
1.30	19.43	19.20	18.81	18.27	17.60	16.79	15.87	14.86	13.76	12.61	11.44	10.25
1.40	19.73	19.49	19.09	18.54	17.85	17.02	16.08	15.04	13.91	12.73	11.53	10.31
1.50	20.03	19.79	19.38	18.82	18.11	17.26	16.29	15.22	14.07	12.86	11.62	10.37
1.60	20.35	20.09	19.68	19.10	18.37	17.50	16.51	15.41	14.22	12.98	11.71	10.43
1.70	20.66	20.41	19.98	19.39	18.64	17.75	16.73	15.60	14.38	13.11	11.80	10.49
1.80	20.99	20.72	20.29	19.68	18.91	18.00	16.95	15.79	14.54	13.23	11.89	10.55
1.90	21.32	21.05	20.60	19.98	19.19	18.25	17.18	15.99	14.70	13.36	11.98	10.61
2.00	21.66	21.38	20.92	20.29	19.48	18.52	17.41	16.19	14.87	13.49	12.07	10.66
2.10	22.01	21.72	21.25	20.60	19.77	18.78	17.65	16.39	15.04	13.62	12.17	10.72
2.20	22.36	22.07	21.59	20.92	20.07	19.06	17.89	16.60	15.21	13.75	12.26	10.77
2.30	22.72	22.43	21.93	21.25	20.38	19.34	18.14	16.81	15.38	13.88	12.35	10.82
2.40	23.09	22.79	22.28	21.58	20.69	19.62	18.39	17.03	15.56	14.01	12.44	10.87
2.50	23.47	23.16	22.64	21.93	21.01	19.91	18.65	17.25	15.73	14.15	12.53	10.92
2.60	23.86	23.54	23.01	22.28	21.34	20.21	18.92	17.47	15.92	14.29	12.62	10.97
2.70	24.25	23.93	23.39	22.63	21.67	20.52	19.19	17.70	16.10	14.42	12.71	11.01
2.80	24.66	24.32	23.77	23.00	22.02	20.83	19.46	17.94	16.29	14.56	12.80	11.06
2.90	25.07	24.73	24.17	23.38	22.37	21.15	19.75	18.18	16.48	14.70	12.89	11.10
3.00	25.49	25.14	24.57	23.76	22.73	21.48	20.03	18.42	16.67	14.84	12.98	11.14
3.10	25.92	25.57	24.98	24.15	23.10	21.82	20.33	18.67	16.87	14.99	13.07	11.17
3.20	26.36	26.00	25.40	24.56	23.47	22.16	20.63	18.92	17.07	15.13	13.15	11.20
3.30	26.81	26.44	25.83	24.97	23.86	22.51	20.94	19.19	17.28	15.27	13.24	11.23
3.40	27.27	26.90	26.27	25.39	24.26	22.87	21.26	19.45	17.49	15.42	13.32	11.26
3.50	27.74	27.36	26.72	25.82	24.66	23.24	21.59	19.72	17.70	15.57	13.41	11.28
3.60	28.22	27.83	27.18	26.26	25.08	23.63	21.92	20.00	17.91	15.72	13.49	11.30
3.70	28.71	28.32	27.65	26.72	25.50	24.02	22.27	20.29	18.14	15.87	13.57	11.31
3.80	29.21	28.81	28.14	27.18	25.94	24.42	22.62	20.58	18.36	16.02	13.65	11.32
3.90	29.72	29.31	28.63	27.66	26.39	24.83	22.98	20.89	18.59	16.17	13.72	11.32
4.00	30.24	29.83	29.14	28.15	26.85	25.25	23.35	21.19	18.83	16.33	13.80	11.32
4.10	30.77	30.36	29.65	28.65	27.33	25.69	23.74	21.51	19.07	16.49	13.87	11.32

Continuación del apéndice 3.

4.20	31.32	30.90	30.18	29.16	27.81	26.13	24.13	21.84	19.31	16.64	13.94	11.30
4.30	31.87	31.45	30.72	29.68	28.31	26.59	24.54	22.17	19.56	16.80	14.00	11.28
4.40	32.44	32.01	31.28	30.22	28.83	27.07	24.96	22.52	19.82	16.96	14.07	11.26
4.50	33.02	32.59	31.85	30.78	29.35	27.56	25.39	22.87	20.09	17.13	14.13	11.22
4.60	33.61	33.17	32.43	31.34	29.90	28.06	25.83	23.24	20.36	17.29	14.18	11.18
4.70	34.21	33.77	33.02	31.93	30.45	28.58	26.29	23.62	20.64	17.46	14.23	11.12
4.80	34.82	34.38	33.63	32.52	31.03	29.12	26.77	24.01	20.92	17.62	14.28	11.06
4.90	35.45	35.01	34.25	33.13	31.62	29.67	27.26	24.42	21.22	17.79	14.32	10.99
5.00	36.09	35.65	34.89	33.76	32.23	30.24	27.77	24.84	21.52	17.96	14.36	10.90
5.10	36.73	36.30	35.54	34.41	32.86	30.83	28.30	25.27	21.84	18.14	14.39	10.80
5.20	37.39	36.96	36.20	35.07	33.50	31.44	28.85	25.73	22.16	18.31	14.41	10.69
5.30	38.07	37.63	36.88	35.75	34.17	32.08	29.42	26.20	22.50	18.49	14.43	10.56
5.40	38.75	38.32	37.57	36.44	34.86	32.73	30.01	26.69	22.84	18.67	14.44	10.42
5.50	39.44	39.03	38.28	37.16	35.56	33.41	30.63	27.20	23.20	18.85	14.43	10.26
5.60	40.15	39.74	39.01	37.89	36.30	34.12	31.27	27.73	23.58	19.04	14.42	10.08
5.70	40.87	40.47	39.75	38.65	37.05	34.85	31.94	28.29	23.97	19.23	14.40	9.87
5.80	41.60	41.21	40.51	39.42	37.83	35.61	32.64	28.88	24.38	19.42	14.37	9.64
5.90	42.33	41.96	41.28	40.21	38.63	36.40	33.38	29.49	24.81	19.61	14.32	9.39
6.00	43.08	42.72	42.07	41.02	39.46	37.22	34.15	30.14	25.27	19.81	14.25	9.11
6.10	43.84	43.50	42.87	41.86	40.32	38.08	34.95	30.82	25.74	20.02	14.17	8.79
6.20	44.61	44.29	43.69	42.71	41.20	38.97	35.80	31.54	26.24	20.22	14.08	8.44
6.30	45.38	45.08	44.52	43.58	42.12	39.90	36.69	32.31	26.77	20.44	13.96	8.05
6.40	46.17	45.89	45.37	44.48	43.06	40.87	37.63	33.12	27.34	20.66	13.81	7.62
6.50	46.96	46.71	46.23	45.40	44.03	41.88	38.62	33.99	27.94	20.88	13.64	7.13
6.60	47.76	47.54	47.10	46.34	45.04	42.94	39.67	34.91	28.59	21.12	13.44	6.59
6.70	48.56	48.37	47.99	47.29	46.08	44.04	40.78	35.90	29.28	21.36	13.20	5.99
6.80	49.37	49.22	48.89	48.27	47.15	45.19	41.95	36.96	30.02	21.61	12.92	5.32
6.90	50.18	50.07	49.80	49.27	48.25	46.39	43.19	38.10	30.83	21.88	12.60	4.58
7.00	51.00	50.92	50.73	50.29	49.39	47.65	44.51	39.33	31.71	22.15	12.22	3.74
7.10	51.82	51.78	51.66	51.33	50.56	48.96	45.91	40.66	32.67	22.45	11.78	2.81
7.20	52.64	52.65	52.60	52.38	51.76	50.33	47.41	42.10	33.73	22.76	11.27	1.76
7.30	53.46	53.51	53.55	53.45	52.99	51.75	48.99	43.67	34.90	23.09	10.68	0.58
7.40	54.28	54.38	54.50	54.53	54.26	53.24	50.68	45.38	36.20	23.46	9.99	-0.75
7.50	55.10	55.24	55.45	55.62	55.55	54.79	52.48	47.25	37.65	23.85	9.17	-2.25
7.60	55.91	56.11	56.41	56.72	56.87	56.39	54.40	49.31	39.28	24.28	8.22	-3.94
7.70	56.72	56.97	57.36	57.83	58.21	58.06	56.44	51.56	41.12	24.77	7.09	-5.86
7.80	57.52	57.82	58.31	58.94	59.57	59.78	58.60	54.05	43.23	25.31	5.75	-8.04
7.90	58.31	58.66	59.26	60.06	60.94	61.55	60.90	56.79	45.64	25.92	4.16	-10.53
8.00	59.09	59.50	60.19	61.16	62.33	63.37	63.33	59.81	48.43	26.64	2.24	-13.36
8.10	59.86	60.32	61.12	62.26	63.71	65.22	65.89	63.15	51.69	27.47	-0.09	-16.59
8.20	60.62	61.13	62.03	63.35	65.10	67.11	68.57	66.84	55.51	28.48	-2.93	-20.29
8.30	61.37	61.93	62.92	64.41	66.47	69.01	71.37	70.89	60.04	29.70	-6.44	-24.51
8.40	62.10	62.71	63.79	65.46	67.82	70.91	74.26	75.35	65.44	31.23	-10.83	-29.32
8.50	62.81	63.47	64.65	66.47	69.14	72.80	77.23	80.20	71.93	33.18	-16.38	-34.80
8.60	63.51	64.21	65.47	67.46	70.41	74.65	80.23	85.44	79.76	35.77	-23.50	-40.99
8.70	64.19	64.92	66.27	68.40	71.64	76.44	83.22	91.03	89.26	39.31	-32.76	-47.91
8.80	64.84	65.62	67.03	69.30	72.81	78.14	86.15	96.87	100.74	44.37	-44.99	-55.52
8.90	65.48	66.29	67.76	70.16	73.90	79.75	88.95	102.85	114.53	51.99	-61.32	-63.71
9.00	66.10	66.93	68.46	70.96	74.91	81.21	91.55	108.73	130.75	64.32	-83.26	-72.21
9.10	66.69	67.54	69.12	71.70	75.83	82.53	93.88	114.28	149.11	86.17	-112.45	-80.61
9.20	67.26	68.13	69.73	72.38	76.64	83.66	95.86	119.15	168.45	130.21	-149.71	-88.30
9.30	67.80	68.68	70.31	73.00	77.36	84.60	97.43	123.03	186.43	236.98	-192.30	-94.58
9.40	68.33	69.21	70.85	73.55	77.96	85.32	98.53	125.62	199.60	557.01	-229.88	-98.73
9.50	68.83	69.71	71.34	74.04	78.45	85.83	99.13	126.69	204.61	1090.31	-245.51	-100.19

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Campo magnético bajo una línea de transmisión de 230 kV de la subestación Los Brillantes hacia Palo Gordo**

Altura/ Servidumbre	-6.00	-5.50	-5.00	-4.50	-4.00	-3.50	-3.00	-2.50	-2.00	-1.50	-1.00	-0.50	0.00
0.00	2.84	2.61	2.46	2.65	2.83	3.00	3.15	3.29	3.40	3.49	3.55	3.59	3.61
0.10	2.86	2.64	2.49	2.68	2.87	3.04	3.19	3.33	3.45	3.54	3.60	3.64	3.66
0.20	2.89	2.66	2.51	2.71	2.90	3.08	3.24	3.38	3.49	3.59	3.66	3.70	3.71
0.30	2.92	2.69	2.53	2.74	2.93	3.11	3.28	3.42	3.54	3.64	3.71	3.75	3.76
0.40	2.95	2.71	2.56	2.77	2.97	3.15	3.32	3.47	3.59	3.69	3.76	3.81	3.82
0.50	2.98	2.74	2.58	2.80	3.00	3.19	3.37	3.52	3.64	3.74	3.82	3.86	3.88
0.60	3.01	2.77	2.61	2.83	3.04	3.23	3.41	3.56	3.70	3.80	3.87	3.92	3.93
0.70	3.04	2.79	2.63	2.86	3.07	3.27	3.46	3.61	3.75	3.85	3.93	3.98	3.99
0.80	3.07	2.82	2.66	2.89	3.11	3.32	3.50	3.67	3.80	3.91	3.99	4.04	4.05
0.90	3.10	2.85	2.68	2.92	3.15	3.36	3.55	3.72	3.86	3.97	4.05	4.10	4.12
1.00	3.13	2.87	2.71	2.95	3.19	3.40	3.60	3.77	3.91	4.03	4.11	4.16	4.18
1.10	3.17	2.90	2.74	2.99	3.22	3.45	3.65	3.82	3.97	4.09	4.17	4.22	4.24
1.20	3.20	2.93	2.76	3.02	3.26	3.49	3.70	3.88	4.03	4.15	4.24	4.29	4.31
1.30	3.23	2.96	2.79	3.05	3.30	3.54	3.75	3.93	4.09	4.21	4.30	4.36	4.37
1.40	3.27	2.99	2.82	3.09	3.34	3.58	3.80	3.99	4.15	4.28	4.37	4.42	4.44
1.50	3.30	3.02	2.84	3.12	3.39	3.63	3.86	4.05	4.21	4.34	4.44	4.49	4.51
1.60	3.34	3.05	2.87	3.16	3.43	3.68	3.91	4.11	4.28	4.41	4.51	4.56	4.58
1.70	3.37	3.08	2.90	3.19	3.47	3.73	3.97	4.17	4.34	4.48	4.58	4.64	4.66
1.80	3.41	3.11	2.93	3.23	3.51	3.78	4.02	4.23	4.41	4.55	4.65	4.71	4.73
1.90	3.44	3.14	2.95	3.26	3.56	3.83	4.08	4.30	4.48	4.62	4.72	4.79	4.81
2.00	3.48	3.17	2.98	3.30	3.60	3.89	4.14	4.36	4.55	4.69	4.80	4.86	4.89
2.10	3.52	3.20	3.01	3.34	3.65	3.94	4.20	4.43	4.62	4.77	4.88	4.94	4.97
2.20	3.56	3.24	3.04	3.38	3.70	3.99	4.26	4.50	4.69	4.85	4.96	5.02	5.05
2.30	3.60	3.27	3.07	3.42	3.74	4.05	4.33	4.57	4.77	4.93	5.04	5.11	5.13
2.40	3.64	3.30	3.10	3.45	3.79	4.11	4.39	4.64	4.84	5.01	5.12	5.19	5.21
2.50	3.68	3.34	3.13	3.49	3.84	4.17	4.46	4.71	4.92	5.09	5.21	5.28	5.30
2.60	3.72	3.37	3.16	3.54	3.89	4.23	4.53	4.79	5.00	5.17	5.29	5.37	5.39
2.70	3.76	3.40	3.19	3.58	3.95	4.29	4.60	4.86	5.08	5.26	5.38	5.46	5.48
2.80	3.80	3.44	3.22	3.62	4.00	4.35	4.67	4.94	5.17	5.34	5.47	5.55	5.57
2.90	3.85	3.48	3.25	3.66	4.05	4.42	4.74	5.02	5.25	5.43	5.56	5.64	5.67
3.00	3.89	3.51	3.28	3.71	4.11	4.48	4.81	5.10	5.34	5.53	5.66	5.74	5.77
3.10	3.94	3.55	3.31	3.75	4.16	4.55	4.89	5.19	5.43	5.62	5.76	5.84	5.86
3.20	3.98	3.58	3.35	3.79	4.22	4.62	4.97	5.27	5.52	5.72	5.85	5.94	5.97
3.30	4.03	3.62	3.38	3.84	4.28	4.69	5.05	5.36	5.62	5.81	5.96	6.04	6.07
3.40	4.08	3.66	3.41	3.89	4.34	4.76	5.13	5.45	5.71	5.92	6.06	6.15	6.17
3.50	4.13	3.70	3.44	3.94	4.40	4.83	5.22	5.54	5.81	6.02	6.17	6.25	6.28
3.60	4.18	3.74	3.48	3.98	4.47	4.91	5.30	5.64	5.91	6.12	6.27	6.36	6.39
3.70	4.23	3.78	3.51	4.03	4.53	4.99	5.39	5.74	6.02	6.23	6.38	6.47	6.50
3.80	4.29	3.82	3.54	4.08	4.60	5.07	5.49	5.84	6.12	6.34	6.50	6.59	6.62
3.90	4.34	3.86	3.58	4.14	4.67	5.15	5.58	5.94	6.23	6.46	6.61	6.71	6.74
4.00	4.40	3.90	3.61	4.19	4.74	5.24	5.68	6.05	6.34	6.57	6.73	6.82	6.86
4.10	4.45	3.95	3.65	4.24	4.81	5.33	5.78	6.15	6.46	6.69	6.85	6.95	6.98
4.20	4.51	3.99	3.68	4.30	4.88	5.42	5.88	6.27	6.58	6.81	6.97	7.07	7.10
4.30	4.58	4.04	3.72	4.36	4.96	5.51	5.98	6.38	6.70	6.93	7.10	7.20	7.23
4.40	4.64	4.08	3.75	4.41	5.04	5.60	6.09	6.50	6.82	7.06	7.23	7.33	7.36
4.50	4.70	4.13	3.79	4.47	5.12	5.70	6.20	6.62	6.95	7.19	7.36	7.46	7.49
4.60	4.77	4.18	3.82	4.54	5.20	5.81	6.32	6.74	7.08	7.32	7.50	7.59	7.63
4.70	4.84	4.23	3.86	4.60	5.29	5.91	6.44	6.87	7.21	7.46	7.63	7.73	7.76
4.80	4.91	4.28	3.90	4.66	5.38	6.02	6.56	7.00	7.35	7.60	7.77	7.87	7.91
4.90	4.99	4.33	3.93	4.73	5.47	6.13	6.69	7.14	7.49	7.74	7.92	8.02	8.05
5.00	5.06	4.38	3.97	4.80	5.57	6.25	6.82	7.28	7.63	7.89	8.06	8.16	8.19
5.10	5.15	4.44	4.01	4.87	5.67	6.37	6.96	7.42	7.78	8.04	8.21	8.31	8.34
5.20	5.23	4.49	4.05	4.94	5.77	6.50	7.10	7.57	7.93	8.19	8.36	8.46	8.49
5.30	5.32	4.55	4.09	5.02	5.88	6.63	7.25	7.73	8.09	8.35	8.52	8.61	8.64
5.40	5.41	4.61	4.13	5.10	6.00	6.77	7.40	7.89	8.25	8.51	8.67	8.77	8.80
5.50	5.51	4.67	4.17	5.18	6.11	6.91	7.55	8.05	8.41	8.67	8.83	8.93	8.96
5.60	5.61	4.74	4.21	5.27	6.24	7.06	7.72	8.22	8.58	8.83	9.00	9.09	9.12
5.70	5.71	4.80	4.25	5.36	6.37	7.21	7.89	8.39	8.75	9.00	9.16	9.25	9.28
5.80	5.82	4.88	4.29	5.45	6.50	7.38	8.06	8.57	8.93	9.18	9.33	9.42	9.45
5.90	5.94	4.95	4.34	5.55	6.64	7.55	8.25	8.76	9.12	9.35	9.51	9.59	9.61
6.00	6.07	5.03	4.38	5.66	6.79	7.73	8.44	8.95	9.30	9.54	9.68	9.76	9.78
6.10	6.20	5.11	4.42	5.77	6.95	7.91	8.64	9.15	9.49	9.72	9.86	9.93	9.95
6.20	6.34	5.19	4.47	5.88	7.12	8.11	8.84	9.35	9.69	9.91	10.04	10.11	10.13
6.30	6.49	5.28	4.52	6.01	7.30	8.32	9.06	9.56	9.89	10.10	10.22	10.28	10.30
6.40	6.65	5.38	4.57	6.14	7.49	8.54	9.29	9.78	10.10	10.29	10.40	10.46	10.48
6.50	6.82	5.48	4.62	6.28	7.69	8.77	9.52	10.01	10.31	10.49	10.59	10.64	10.66
6.60	7.01	5.59	4.67	6.43	7.91	9.02	9.77	10.24	10.53	10.69	10.78	10.82	10.83
6.70	7.21	5.71	4.72	6.59	8.14	9.28	10.02	10.48	10.75	10.89	10.97	11.00	11.01
6.80	7.43	5.84	4.78	6.76	8.39	9.55	10.29	10.73	10.97	11.10	11.16	11.19	11.19

Continuación del apéndice 4.

6.90	7.66	5.97	4.84	6.95	8.66	9.84	10.57	10.99	11.20	11.31	11.35	11.37	11.38
7.00	7.92	6.13	4.90	7.16	8.95	10.15	10.87	11.25	11.44	11.52	11.55	11.56	11.56
7.10	8.20	6.29	4.97	7.39	9.26	10.48	11.17	11.52	11.68	11.73	11.74	11.74	11.74
7.20	8.50	6.47	5.04	7.63	9.60	10.84	11.50	11.80	11.92	11.95	11.94	11.92	11.92
7.30	8.84	6.67	5.12	7.91	9.97	11.21	11.83	12.09	12.16	12.16	12.13	12.11	12.10
7.40	9.21	6.90	5.20	8.22	10.38	11.61	12.18	12.38	12.41	12.38	12.33	12.29	12.28
7.50	9.63	7.16	5.29	8.56	10.82	12.03	12.54	12.68	12.66	12.59	12.52	12.48	12.46
7.60	10.09	7.44	5.39	8.95	11.31	12.49	12.92	12.99	12.92	12.81	12.72	12.66	12.64
7.70	10.60	7.77	5.50	9.39	11.85	12.97	13.31	13.30	13.17	13.03	12.91	12.84	12.81
7.80	11.18	8.15	5.63	9.89	12.44	13.48	13.71	13.62	13.43	13.24	13.10	13.02	12.99
7.90	11.83	8.59	5.77	10.47	13.09	14.03	14.13	13.93	13.68	13.46	13.29	13.19	13.16
8.00	12.57	9.11	5.94	11.13	13.82	14.60	14.56	14.26	13.93	13.67	13.48	13.36	13.33
8.10	13.40	9.73	6.14	11.91	14.61	15.21	14.99	14.58	14.18	13.87	13.66	13.53	13.49
8.20	14.34	10.47	6.37	12.83	15.50	15.85	15.43	14.90	14.43	14.08	13.84	13.70	13.66
8.30	15.40	11.37	6.66	13.92	16.47	16.51	15.88	15.21	14.67	14.28	14.01	13.86	13.81
8.40	16.61	12.49	7.03	15.22	17.53	17.20	16.33	15.52	14.91	14.47	14.19	14.02	13.97
8.50	77.03	59.76	33.18	71.93	80.20	77.23	72.80	69.14	66.47	64.65	63.47	62.81	62.60
8.60	83.44	67.12	35.77	79.76	85.44	80.23	74.65	70.41	67.46	65.47	64.21	63.51	63.28
8.70	90.57	76.62	39.31	89.26	91.03	83.22	76.44	71.64	68.40	66.27	64.92	64.19	63.95
8.80	98.41	89.08	44.37	100.74	96.87	86.15	78.14	72.81	69.30	67.03	65.62	64.84	64.60
8.90	106.81	105.65	51.99	114.53	102.85	88.95	79.75	73.90	70.16	67.76	66.29	65.48	65.22
9.00	115.52	127.81	64.32	130.75	108.73	91.55	81.21	74.91	70.96	68.46	66.93	66.10	65.83
9.10	124.13	157.23	86.17	149.11	114.28	93.88	82.53	75.83	71.70	69.12	67.54	66.69	66.42
9.20	132.03	194.71	130.21	168.45	119.15	95.86	83.66	76.64	72.38	69.73	68.13	67.26	66.98
9.30	138.51	237.53	236.98	186.43	123.03	97.43	84.60	77.36	73.00	70.31	68.68	67.80	67.53
9.40	142.86	275.32	557.01	199.60	125.62	98.53	85.32	77.96	73.55	70.85	69.21	68.33	68.05
9.50	144.53	291.17	1090.31	204.61	126.69	99.13	85.83	78.45	74.04	71.34	69.71	68.83	68.55

Altura/ Servidumbre	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
0.00	16.07	15.90	15.62	15.23	14.74	14.16	13.50	12.77	11.98	11.15	10.29	9.42
0.10	16.30	16.12	15.83	15.44	14.94	14.34	13.66	12.91	12.11	11.25	10.37	9.48
0.20	16.53	16.35	16.05	15.65	15.13	14.52	13.83	13.06	12.23	11.36	10.46	9.55
0.30	16.77	16.58	16.28	15.86	15.34	14.71	14.00	13.21	12.36	11.47	10.55	9.61
0.40	17.01	16.82	16.51	16.08	15.54	14.90	14.17	13.36	12.49	11.58	10.63	9.68
0.50	17.26	17.06	16.74	16.31	15.75	15.10	14.35	13.52	12.63	11.69	10.72	9.74
0.60	17.51	17.31	16.98	16.53	15.97	15.29	14.53	13.68	12.76	11.80	10.81	9.81
0.70	17.77	17.56	17.23	16.77	16.19	15.50	14.71	13.84	12.90	11.91	10.90	9.87
0.80	18.03	17.82	17.48	17.01	16.41	15.70	14.89	14.00	13.04	12.03	10.99	9.93
0.90	18.30	18.09	17.73	17.25	16.64	15.91	15.08	14.16	13.18	12.14	11.07	10.00
1.00	18.57	18.35	17.99	17.50	16.87	16.12	15.27	14.33	13.32	12.26	11.16	10.06
1.10	18.85	18.63	18.26	17.75	17.11	16.34	15.47	14.50	13.47	12.38	11.25	10.12
1.20	19.14	18.91	18.53	18.01	17.35	16.57	15.67	14.68	13.61	12.49	11.34	10.19
1.30	19.43	19.20	18.81	18.27	17.60	16.79	15.87	14.86	13.76	12.61	11.44	10.25
1.40	19.73	19.49	19.09	18.54	17.85	17.02	16.08	15.04	13.91	12.73	11.53	10.31
1.50	20.03	19.79	19.38	18.82	18.11	17.26	16.29	15.22	14.07	12.86	11.62	10.37
1.60	20.35	20.09	19.68	19.10	18.37	17.50	16.51	15.41	14.22	12.98	11.71	10.43
1.70	20.66	20.41	19.98	19.39	18.64	17.75	16.73	15.60	14.38	13.11	11.80	10.49
1.80	20.99	20.72	20.29	19.68	18.91	18.00	16.95	15.79	14.54	13.23	11.89	10.55
1.90	21.32	21.05	20.60	19.98	19.19	18.25	17.18	15.99	14.70	13.36	11.98	10.61
2.00	21.66	21.38	20.92	20.29	19.48	18.52	17.41	16.19	14.87	13.49	12.07	10.66
2.10	22.01	21.72	21.25	20.60	19.77	18.78	17.65	16.39	15.04	13.62	12.17	10.72
2.20	22.36	22.07	21.59	20.92	20.07	19.06	17.89	16.60	15.21	13.75	12.26	10.77
2.30	22.72	22.43	21.93	21.25	20.38	19.34	18.14	16.81	15.38	13.88	12.35	10.82
2.40	23.09	22.79	22.28	21.58	20.69	19.62	18.39	17.03	15.56	14.01	12.44	10.87
2.50	23.47	23.16	22.64	21.93	21.01	19.91	18.65	17.25	15.73	14.15	12.53	10.92
2.60	23.86	23.54	23.01	22.28	21.34	20.21	18.92	17.47	15.92	14.29	12.62	10.97
2.70	24.25	23.93	23.39	22.63	21.67	20.52	19.19	17.70	16.10	14.42	12.71	11.01
2.80	24.66	24.32	23.77	23.00	22.02	20.83	19.46	17.94	16.29	14.56	12.80	11.06
2.90	25.07	24.73	24.17	23.38	22.37	21.15	19.75	18.18	16.48	14.70	12.89	11.10
3.00	25.49	25.14	24.57	23.76	22.73	21.48	20.03	18.42	16.67	14.84	12.98	11.14
3.10	25.92	25.57	24.98	24.15	23.10	21.82	20.33	18.67	16.87	14.99	13.07	11.17
3.20	26.36	26.00	25.40	24.56	23.47	22.16	20.63	18.92	17.07	15.13	13.15	11.20
3.30	26.81	26.44	25.83	24.97	23.86	22.51	20.94	19.19	17.28	15.27	13.24	11.23
3.40	27.27	26.90	26.27	25.39	24.26	22.87	21.26	19.45	17.49	15.42	13.32	11.26
3.50	27.74	27.36	26.72	25.82	24.66	23.24	21.59	19.72	17.70	15.57	13.41	11.28
3.60	28.22	27.83	27.18	26.26	25.08	23.63	21.92	20.00	17.91	15.72	13.49	11.30
3.70	28.71	28.32	27.65	26.72	25.50	24.02	22.27	20.29	18.14	15.87	13.57	11.31

Continuación del apéndice 4.

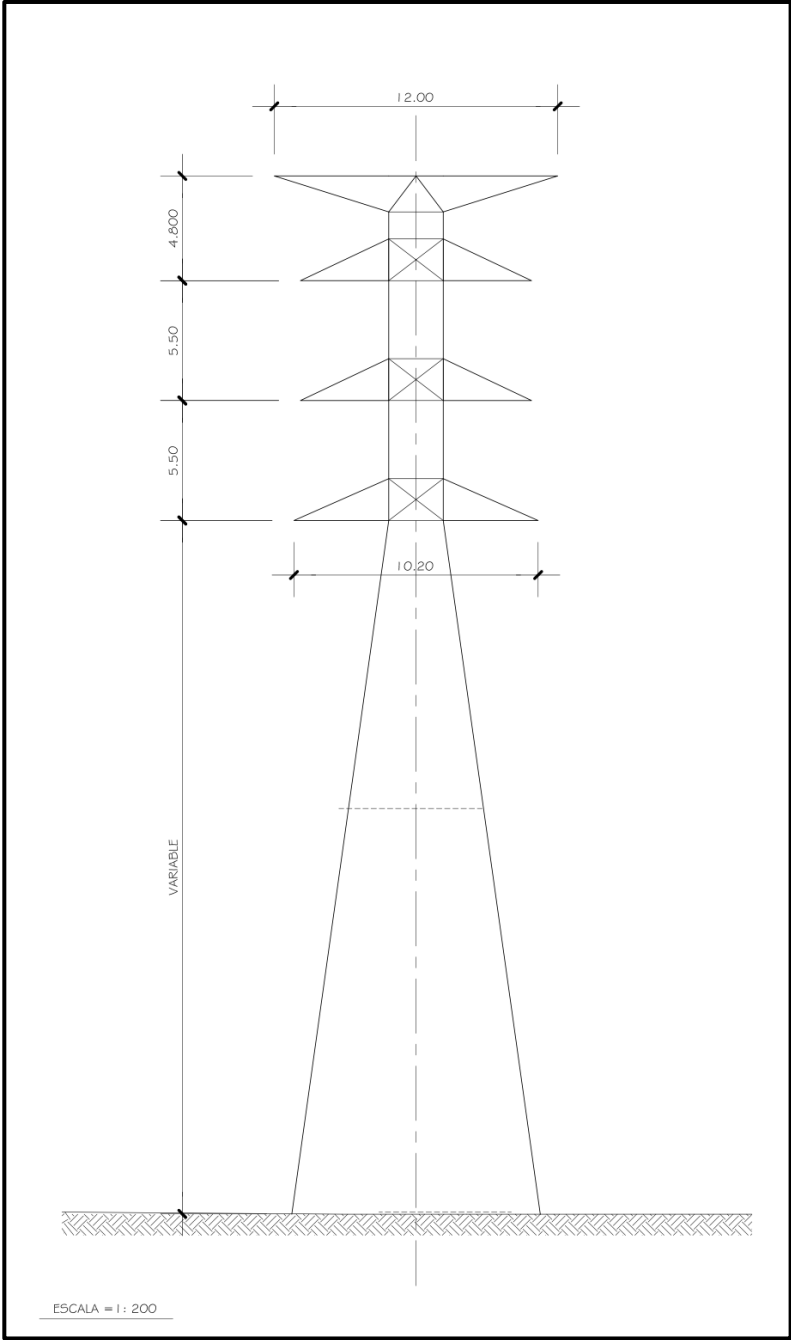
3.80	29.21	28.81	28.14	27.18	25.94	24.42	22.62	20.58	18.36	16.02	13.65	11.32
3.90	29.72	29.31	28.63	27.66	26.39	24.83	22.98	20.89	18.59	16.17	13.72	11.32
4.00	30.24	29.83	29.14	28.15	26.85	25.25	23.35	21.19	18.83	16.33	13.80	11.32
4.10	30.77	30.36	29.65	28.65	27.33	25.69	23.74	21.51	19.07	16.49	13.87	11.32
4.20	31.32	30.90	30.18	29.16	27.81	26.13	24.13	21.84	19.31	16.64	13.94	11.30
4.30	31.87	31.45	30.72	29.68	28.31	26.59	24.54	22.17	19.56	16.80	14.00	11.28
4.40	32.44	32.01	31.28	30.22	28.83	27.07	24.96	22.52	19.82	16.96	14.07	11.26
4.50	33.02	32.59	31.85	30.78	29.35	27.56	25.39	22.87	20.09	17.13	14.13	11.22
4.60	33.61	33.17	32.43	31.34	29.90	28.06	25.83	23.24	20.36	17.29	14.18	11.18
4.70	34.21	33.77	33.02	31.93	30.45	28.58	26.29	23.62	20.64	17.46	14.23	11.12
4.80	34.82	34.38	33.63	32.52	31.03	29.12	26.77	24.01	20.92	17.62	14.28	11.06
4.90	35.45	35.01	34.25	33.13	31.62	29.67	27.26	24.42	21.22	17.79	14.32	10.99
5.00	36.09	35.65	34.89	33.76	32.23	30.24	27.77	24.84	21.52	17.96	14.36	10.90
5.10	36.73	36.30	35.54	34.41	32.86	30.83	28.30	25.27	21.84	18.14	14.39	10.80
5.20	37.39	36.96	36.20	35.07	33.50	31.44	28.85	25.73	22.16	18.31	14.41	10.69
5.30	38.07	37.63	36.88	35.75	34.17	32.08	29.42	26.20	22.50	18.49	14.43	10.56
5.40	38.75	38.32	37.57	36.44	34.86	32.73	30.01	26.69	22.84	18.67	14.44	10.42
5.50	39.44	39.03	38.28	37.16	35.56	33.41	30.63	27.20	23.20	18.85	14.43	10.26
5.60	40.15	39.74	39.01	37.89	36.30	34.12	31.27	27.73	23.58	19.04	14.42	10.08
5.70	40.87	40.47	39.75	38.65	37.05	34.85	31.94	28.29	23.97	19.23	14.40	9.87
5.80	41.60	41.21	40.51	39.42	37.83	35.61	32.64	28.88	24.38	19.42	14.37	9.64
5.90	42.33	41.96	41.28	40.21	38.63	36.40	33.38	29.49	24.81	19.61	14.32	9.39
6.00	43.08	42.72	42.07	41.02	39.46	37.22	34.15	30.14	25.27	19.81	14.25	9.11
6.10	43.84	43.50	42.87	41.86	40.32	38.08	34.95	30.82	25.74	20.02	14.17	8.79
6.20	44.61	44.29	43.69	42.71	41.20	38.97	35.80	31.54	26.24	20.22	14.08	8.44
6.30	45.38	45.08	44.52	43.58	42.12	39.90	36.69	32.31	26.77	20.44	13.96	8.05
6.40	46.17	45.89	45.37	44.48	43.06	40.87	37.63	33.12	27.34	20.66	13.81	7.62
6.50	46.96	46.71	46.23	45.40	44.03	41.88	38.62	33.99	27.94	20.88	13.64	7.13
6.60	47.76	47.54	47.10	46.34	45.04	42.94	39.67	34.91	28.59	21.12	13.44	6.59
6.70	48.56	48.37	47.99	47.29	46.08	44.04	40.78	35.90	29.28	21.36	13.20	5.99
6.80	49.37	49.22	48.89	48.27	47.15	45.19	41.95	36.96	30.02	21.61	12.92	5.32
6.90	50.18	50.07	49.80	49.27	48.25	46.39	43.19	38.10	30.83	21.88	12.60	4.58
7.00	51.00	50.92	50.73	50.29	49.39	47.65	44.51	39.33	31.71	22.15	12.22	3.74
7.10	51.82	51.78	51.66	51.33	50.56	48.96	45.91	40.66	32.67	22.45	11.78	2.81
7.20	52.64	52.65	52.60	52.38	51.76	50.33	47.41	42.10	33.73	22.76	11.27	1.76
7.30	53.46	53.51	53.55	53.45	52.99	51.75	48.99	43.67	34.90	23.09	10.68	0.58
7.40	54.28	54.38	54.50	54.53	54.26	53.24	50.68	45.38	36.20	23.46	9.99	-0.75
7.50	55.10	55.24	55.45	55.62	55.55	54.79	52.48	47.25	37.65	23.85	9.17	-2.25
7.60	55.91	56.11	56.41	56.72	56.87	56.39	54.40	49.31	39.28	24.28	8.22	-3.94
7.70	56.72	56.97	57.36	57.83	58.21	58.06	56.44	51.56	41.12	24.77	7.09	-5.86
7.80	57.52	57.82	58.31	58.94	59.57	59.78	58.60	54.05	43.23	25.31	5.75	-8.04
7.90	58.31	58.66	59.26	60.06	60.94	61.55	60.90	56.79	45.64	25.92	4.16	-10.53
8.00	59.09	59.50	60.19	61.16	62.33	63.37	63.33	59.81	48.43	26.64	2.24	-13.36
8.10	59.86	60.32	61.12	62.26	63.71	65.22	65.89	63.15	51.69	27.47	-0.09	-16.59
8.20	60.62	61.13	62.03	63.35	65.10	67.11	68.57	66.84	55.51	28.48	-2.93	-20.29
8.30	61.37	61.93	62.92	64.41	66.47	69.01	71.37	70.89	60.04	29.70	-6.44	-24.51
8.40	62.10	62.71	63.79	65.46	67.82	70.91	74.26	75.35	65.44	31.23	-10.83	-29.32
8.50	62.81	63.47	64.65	66.47	69.14	72.80	77.23	80.20	71.93	33.18	-16.38	-34.80
8.60	63.51	64.21	65.47	67.46	70.41	74.65	80.23	85.44	79.76	35.77	-23.50	-40.99
8.70	64.19	64.92	66.27	68.40	71.64	76.44	83.22	91.03	89.26	39.31	-32.76	-47.91
8.80	64.84	65.62	67.03	69.30	72.81	78.14	86.15	96.87	100.74	44.37	-44.99	-55.52
8.90	65.48	66.29	67.76	70.16	73.90	79.75	88.95	102.85	114.53	51.99	-61.32	-63.71
9.00	66.10	66.93	68.46	70.96	74.91	81.21	91.55	108.73	130.75	64.32	-83.26	-72.21
9.10	66.69	67.54	69.12	71.70	75.83	82.53	93.88	114.28	149.11	86.17	-112.45	-80.61
9.20	67.26	68.13	69.73	72.38	76.64	83.66	95.86	119.15	168.45	130.21	-149.71	-88.30
9.30	67.80	68.68	70.31	73.00	77.36	84.60	97.43	123.03	186.43	236.98	-192.30	-94.58
9.40	68.33	69.21	70.85	73.55	77.96	85.32	98.53	125.62	199.60	557.01	-229.88	-98.73
9.50	68.83	69.71	71.34	74.04	78.45	85.83	99.13	126.69	204.61	1090.31	-245.51	-100.19

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

- | | |
|---------|---|
| Anexo 1 | Estructura 1. Torre de transmisión tipo cilíndrica para línea de transmisión de 230 kV. |
| Anexo 2 | Vanos entre estructuras de torres de transmisión para 230 kV. |
| Anexo 3 | Medición del campo electromagnético en subestación Guate Sur. |
| Anexo 4 | Medición del campo electromagnético en subestación Guate Este. |
| Anexo 5 | Medición del campo electromagnético en Casa y Campo. |

Anexo 1. **Torre de transmisión tipo cilíndrica para línea de transmisión de 230 kV**



Fuente: Instituto nacional de electrificación (INDE).

Anexo 2. Vanos entre estructuras de torres de transmisión para 230 kV

No.	LAT (Identificación)	Nombre Secundario	Nivel Tensión (kV)	Zona	Longitud (km)	Cantidad Circuitos	Pararrayos a lo largo de la línea.	Conductor Real	No. De Conductores por Fase	No. De Cables de Guarda	Suelo	Tipos de Estructura	Configuración de Estructura	No. De Estructuras Totales por Línea
1	GES-231 - GSU-231	Guatemala Este - Guatemala Sur	230	Rural	12.746	1		HAWK 477	2	2	Llano Ond.	Cielos/Autospoortada	Vertical	37
2	IGNO-231 - GES-231	Guatemala Norte - Guatemala Este	230	Rural	17.812	1		HAWK 477	2	2	Llano Ond.	Cielos/Autospoortada	Vertical	57
3	IGNO-231 - GSU-231	Guatemala Norte - Guatemala Sur	230	Rural	30.559	1		HAWK 477	2	2	Llano Ond.	Cielos/Autospoortada	Vertical	94
4	ESC-138 - JUR-138	Escuintla - Jurun Marina	138	Rural	12.922	1		HAWK 477	1	1	Llano Ond.	Triangular	Vertical	42
5	GSU-138 - JUR-138	Guatemala Sur - Jurun Marina	138	Rural	32.398	1	23	HAWK 477	1	1	Montañoso	Cielos/Autospoortada	Vertical	92
6	ESC-691 - EJO-69	Escuintla - El Jocote	69	Rural	13.580	1	4	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	Horizontal	81
7	COC-691 - PNT-692	Cocales - Pantaleon	69	Rural	25.400	1	8	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	Horizontal	136
8	EJO-69 - PNT-691	El Jocote - Pantaleon	69	Rural	11.000	1	6	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	Horizontal	68
9	COC-69 - CAO-69	Cocales - Chicacao	69	Rural	26.950	1	1	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	Horizontal	129
10	LBR-691 - EPI-69	Los Brillantes - El Pilar	69	Rural	9.304	1	1	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	Horizontal	69
11	LCR-69 - EPI-69	La Cruz - El Pilar	69	Rural	1.260	1	1	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	Horizontal	9
12	MAZ-69 - CAO-69	Mazatenango - Chicacao	69	Rural	22.270	1	4	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	Horizontal	128
13	MAZ-69 - LCR-69	Mazatenango - La Cruz	69	Rural	10.562	1	1	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	Horizontal	49
14	IGNO-691 - NOV-69	Guatemala Norte - Cemebo Novella (est. No. 86)	69	Urbana	7.075	1	1	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	Horizontal	68
15	LRU-69 - GEN-69	La Ruidosa - Genor	69	Rural	42.100	1	4	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	Horizontal	211
16	NOV-69 - SAN-69	Cementos Novella (est. No. 89) - Sanarate	69	Rural	13.090	1	1	HAWK 477	1	2	Montañoso	Concreto/retenidas	horizontal	57
17	PAN-69 - MVE-69	Panaluva - Mbyuelas	69	Rural	25.800	1	2	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	horizontal	137
18	PAN-69 - SCR-69	Santa Cruz - Panaluva	69	Rural	10.279	1	1	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	horizontal	65
19	PBA-69 - GEN-69	Puerto Barrios - Genor	69	Rural	2.100	1	1	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	horizontal	17
20	SAN-69 - RAN-69	Sanarate Rancho	69	Rural	18.000	1	2	HAWK 477	1	2	Montañoso	Concreto/retenidas	horizontal	63
21	BSCR-69 - TEC-692	Teculután - Santa Cruz	69	Rural	3.600	1	1	HAWK 477	1	2	Llano Ond.	Concreto/retenidas	horizontal	27

Fuente: Instituto nacional de electrificación (INDE).

Anexo 3. **Medición del campo electromagnético en subestación Guate Sur**



**Dirección General de Energía
Radiaciones No Ionizantes**

24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363 ext. 2112 Fax: 24196310
E-mail: jeferadiacionesnoionizantes@mem.gob.gt

**Anexo 1
FORMATO PARA
MEDICIONES DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO**

INFORMACIÓN GENERAL					
TIPO DE INSPECCIÓN		SEGUIMIENTO			
FECHA	<u>14/08/12</u>	HORA DE INICIO:	<u>10:00</u>	HORA DE FINALIZACIÓN	<u>12:00</u>

INFORMACIÓN DE LA INSTALACIÓN:			
NOMBRE	GUATE SUR		
DIRECCIÓN	SAN JOSE VILLANUEVA, KM. 14.5		
VOLTAJE DE LÍNEA	230 KV	COORDENADAS hddd°mm'ss.s"	N 14°32'40.1"
			W 090°32'16.0"
COORDENADAS (UTM)	15 P 0759941 E		1609319 N
ALTURA (m.s.n.m)	1407	TEMPERATURA	



Continuación del anexo 3.



**Dirección General de Energía
Radiaciones No Ionizantes**

24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363 ext. 2112 Fax: 24196310
E-mail: jeferadiacionesnoionizantes@mem.gob.gt

Distancia (m)	Perfil Lateral				Distancia (m)	Perfil Longitudinal			
	Campo Eléctrico (4.10667) (KV/m)		Campo Magnético (66.67) (A/m)			Campo Eléctrico (4.10667) (KV/m)		Campo Magnético (66.67) (A/m)	
	Valor Medido	Valor Máximo	Valor Medido	Valor Máximo		Valor Medido	Valor Máximo	Valor Medido	Valor Máximo
0	2.73	3.67	1.120	1.349	0	2.73	3.67	1.120	1.349
4	2.07	3.08	0.88	0.98	+5	3.07	4.27	1.089	1.144
6	1.67	3.65	0.702	0.748	+10	3.12	4.24	0.832	1.138
					-5	2.24	4.00	1.021	1.132
					-10	1.93	3.86	1.068	1.198

NOTA: Los valores medidos se deben realizar en un tiempo de 6 minutos en cada punto de medición
Distancia recomendadas en perfil Lateral 0, 4, 6 m., para el perfil longitudinal se recomienda por lo menos en 5 puntos a partir del
vano medio en ambas direcciones.



Continuación del anexo 3.



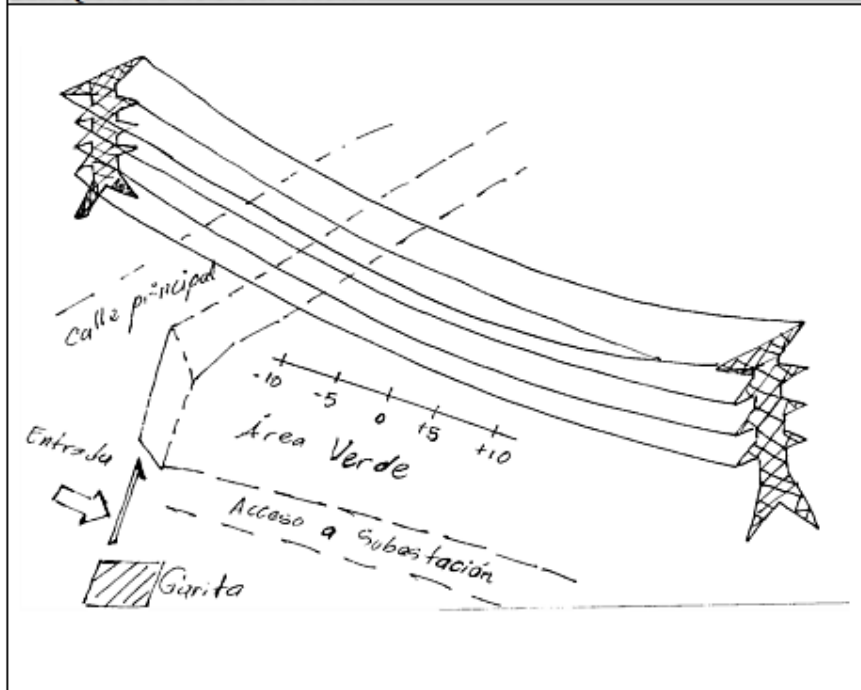
**Dirección General de Energía
Radiaciones No Ionizantes**

24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363 ext. 2112 Fax: 24196310
E-mail: jeferadiacionesnoionizantes@mem.gob.gt

Observaciones:

Valores medidos dentro del perímetro de la subestación de Guate Sur

CROQUIS DE LA INSTALACION:



Fuente: Dirección general de energía, Ministerio de Energía y Minas.

Anexo 4. **Medición de campo electromagnético en subestación Guate Este**



**Dirección General de Energía
Radiaciones No Ionizantes**

24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363 ext. 2112 Fax: 24196310
E-mail: jeferadiacionesnoionizantes@mem.gob.gt

**FORMATO PARA
MEDICIONES DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO**

INFORMACIÓN GENERAL					
TIPO DE INSPECCIÓN		Inicial			
FECHA	24/07 /12	HORA DE INICIO:	08:45	HORA DE FINALIZACIÓN	10:30

INFORMACIÓN DE LA INSTALACIÓN:			
NOMBRE	Subestación Guate-Este		
DIRECCIÓN	Aldea Don Justo, Santa Catarina Pinula, Km. 18.5 Carretera a El Salvador		
VOLTAJE DE LÍNEA	230 KV	COORDENADAS hddd°mm'ss.s"	N 14°32'15.3"
			W 090°28'23.5"
COORDENADAS (UTM)	15 P 0772306 E		1608689 N
ALTURA (m.s.n.m)	1910 m	TEMPERATURA	19 °C



Continuación del anexo 4.



**Dirección General de Energía
Radiaciones No Ionizantes**

24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363 ext. 2112 Fax: 24196310
E-mail: jeferadiacionesnoionizantes@mem.gob.gt

Distancia (m)	Perfil Lateral				Distancia (m)	Perfil Longitudinal			
	Campo Eléctrico (4166.67) (V/m)		Campo Magnético (66.67) (A/m)			Campo Eléctrico (4166.67) (V/m)		Campo Magnético (66.67) (A/m)	
	Valor Medido	Valor Máximo	Valor Medido	Valor Máximo		Valor Medido	Valor Máximo	Valor Medido	Valor Máximo
0	769	1091	0.328	0.373					
4	910	1230	0.315	0.433					
6	772	1191	0.249	0.361					

NOTA: Los valores medidos se deben realizar en un tiempo de 6 minutos en cada punto de medición
Distancia recomendadas en perfil Lateral 0, 4, 6 m., para el perfil longitudinal se recomienda por lo menos en 5 puntos a partir del
vano medio en ambas direcciones.



Continuación del anexo 4.

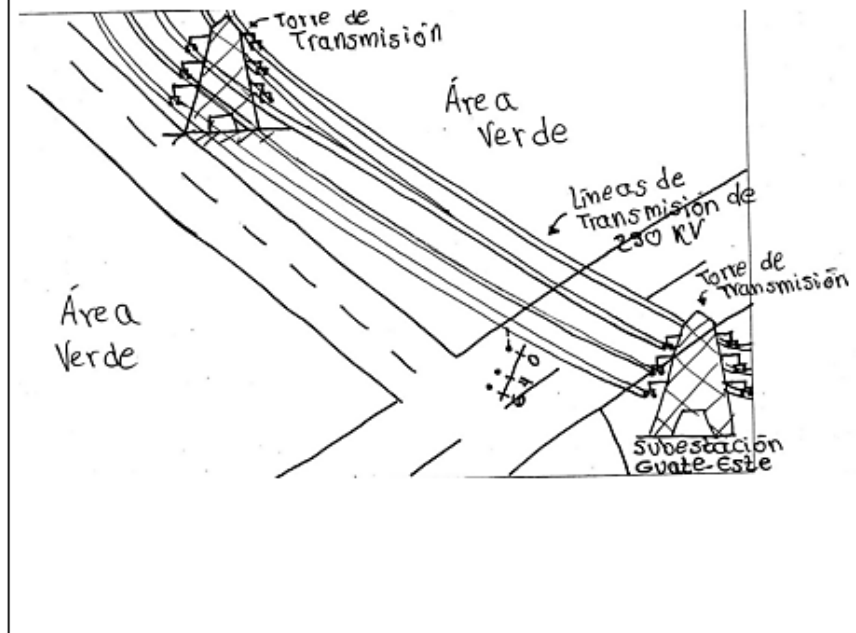


**Dirección General de Energía
Radiaciones No Ionizantes**

24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363 ext. 2112 Fax: 24196310
E-mail: jeferadiacionesnoionizantes@mem.gob.gt

Observaciones:

CROQUIS DE LA INSTALACION:



Fuente: Dirección general de energía, Ministerio de Energía y Minas.

Anexo 5. **Medición de campo electromagnético en Casa y Campo**



**Dirección General de Energía
Radiaciones No Ionizantes**

24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363 ext. 2112 Fax: 24196310
E-mail: jeferadiacionesnoionizantes@mem.gob.gt

**FORMATO PARA
MEDICIONES DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO**

INFORMACIÓN GENERAL					
TIPO DE INSPECCIÓN		Inicial			
FECHA	24/07 /12	HORA DE INICIO:	11:10	HORA DE FINALIZACIÓN	12:45

INFORMACIÓN DE LA INSTALACIÓN:			
NOMBRE	Casa y Campo		
DIRECCIÓN	Km. 23.5 Carretera a El Salvador		
VOLTAJE DE LÍNEA	230 KV	COORDENADAS hddd°mm'ss.s"	N 14° 29'22.3"
			W 090°28'56.1"
COORDENADAS (UTM)	15 P 0771384 E		1603358 N
ALTURA (m.s.n.m)	1782 m	TEMPERATURA	27 °C



Continuación del anexo 5.



**Dirección General de Energía
Radiaciones No Ionizantes**

24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363 ext. 2112 Fax: 24196310
E-mail: jeferadiacionesnoionizantes@mem.gob.gt

Distancia (m)	Perfil Lateral				Distancia (m)	Perfil Longitudinal			
	Campo Eléctrico (4166.67) (V/m)		Campo Magnético (66.67) (A/m)			Campo Eléctrico (4166.67) (V/m)		Campo Magnético (66.67) (A/m)	
	Valor Medido	Valor Máximo	Valor Medido	Valor Máximo		Valor Medido	Valor Máximo	Valor Medido	Valor Máximo
					-10	1400	3560	0.338	--
					-5	1340	2560	0.319	0.350
					0	1150	1270	0.313	0.357
					5	982	2200	0.380	0.437
					10	573	2050	0.337	0.543

NOTA: Los valores medidos se deben realizar en un tiempo de 6 minutos en cada punto de medición
Distancia recomendadas en perfil Lateral 0, 4, 6 m., para el perfil longitudinal se recomienda por lo menos en 5 puntos a partir del
vano medio en ambas direcciones.



Continuación del anexo 5.

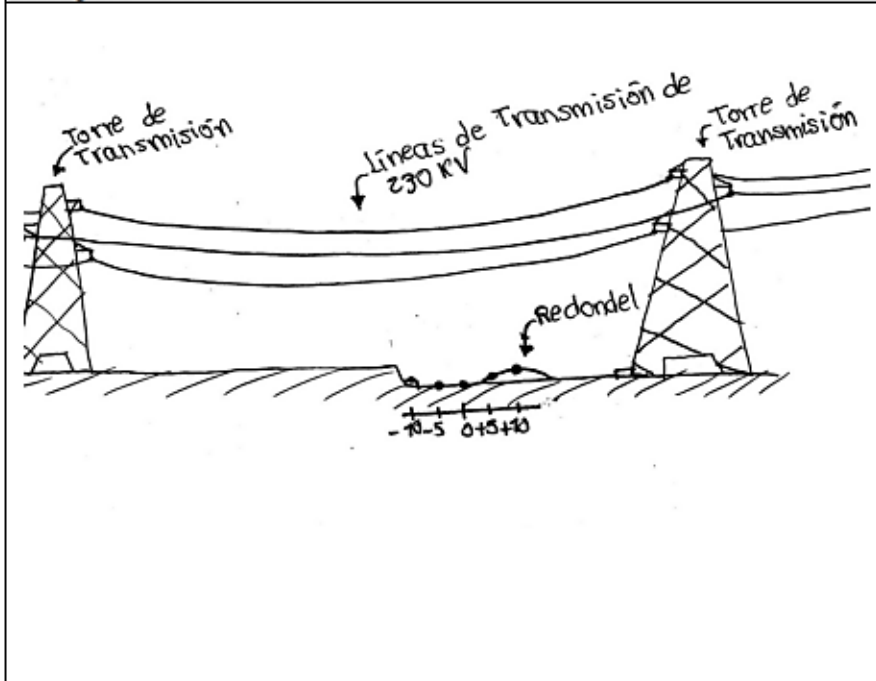


**Dirección General de Energía
Radiaciones No Ionizantes**

24 calle 21-12 zona 12, Tel: PBX 2419-6363 ext. 2112 Fax: 24196310
E-mail: jeferadiacionesnoionizantes@mem.gob.gt

Observaciones:

CROQUIS DE LA INSTALACION:



Fuente: Dirección general de energía, Ministerio de Energía y Minas.