



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA**

**ESTIMACIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS EN LÍNEAS AÉREAS  
EN HVDC DE CUATRO POLOS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA**

**SEBASTIÁN ANDRÉS CABEZAS CAMPOS**

**PROFESOR GUÍA:  
NELSON MORALES OSORIO**

**MIEMBROS DE LA COMISION  
ALFREDO SCHNELL DRESEL  
ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA**

**SANTIAGO DE CHILE  
JUNIO DE 2012**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
ELECTRICISTA.  
POR: SEBASTIÁN CABEZAS CAMPOS  
FECHA: 30/07/2012  
PROF. GUÍA: NELSON MORALES OSORIO

## **Estimación de Campos Eléctricos y Magnéticos en líneas Aéreas en HVDC de cuatro polos.**

La incorporación de sistemas de transmisión de energía en corriente continua en un nivel de tensión de 500 kV, hace indispensable conocer cuáles serán sus posibles efectos en el entorno que circundará las líneas aéreas que transmitirán la energía eléctrica hasta los centros de distribución y consumo de energía.

En esta memoria se plantea la creación de un modelo teórico que permita estimar de manera aproximada cuales serán algunos de los efectos que la operación de una línea aérea de cuatro polos de un sistema de transmisión en HVDC (500 kV) puede generar en su entorno.

Primero, se recopilan los procedimientos teóricos existentes, en lo relativo al cálculo de los campos eléctricos y magnéticos estáticos que se generan en torno a las líneas y la ocurrencia del fenómeno corona, lo que permite estimar y predecir, con cierto grado de exactitud, el nivel de contaminación electromagnética que introducen en el ambiente. Otro efecto que se estima es el nivel de ruido audible producido en torno a las líneas aéreas en HDCV.

Posteriormente, se realiza una adaptación de los modelos matemáticos al caso de una línea aérea de cuatro polos en un sistema HVDC de 500 kV, realizando los cálculos correspondientes para el caso en estudio, y luego, finalmente, poder construir un modelo que permita estimar la magnitud de los efectos que se mencionaron previamente.

Finalmente, se comparan los resultados obtenidos con el caso de una línea de transmisión en HVDC bipolar de un circuito, para mostrar, en lo referente al campo eléctrico generado en el entorno de la línea, que, en el caso estudiado en este trabajo, es dos a tres veces la magnitud mayor que en el caso de un solo circuito.

## **Agradecimientos**

Quisiera agradecer a mi Profesor guía, el Sr. Nelson Morales Osorio, por la gran ayuda y paciencia que tuvo para conmigo a lo largo de este proceso.

Agradecer además a mis compañeros que me ayudaron a desarrollar esta memoria.

Especiales gracias al Profesor PhD Marcos Orchard, por su buena voluntad, y por su invaluable ayuda en la última parte de este proceso.

Y sobre todo a mi familia, que me brindó todo su apoyo y, a su manera, me ayudaron mucho más de lo que ellos creen.

# Contenido

Estimación de Campos Eléctricos y Magnéticos en líneas en HVDC .....	II
Agradecimientos .....	III
Índice de tablas .....	V
Índice de figuras .....	VI
1. Introducción .....	1
1.1. Objetivos .....	5
1.1.1. Objetivo General.....	5
1.1.2. Objetivos específicos.....	5
1.2. Alcance de la memoria .....	5
1.3. Estructura del trabajo y metodología .....	5
2. Antecedentes .....	6
2.1. Historia de los Sistemas de Transmisión en HVDC [14] .....	6
2.2. Método de cálculo del Campo Eléctrico en una línea HVDC de doble circuito [3].....	8
2.2.1. Voltaje de inicio de corona para cada polo.....	12
2.2.2. Cálculo del campo eléctrico sobre la superficie del terreno.....	14
2.3. Fórmulas para predecir el ruido audible [1] [6].....	15
2.3.1. Distribución acumulativa de probabilidad.....	16
2.3.2. Espectros de frecuencia .....	17
2.3.3. Propagación de sonido y atenuación .....	18
2.3.4. Derivación de la ecuación para computar los niveles de potencia acústica para fuente lineal.....	18
2.3.5. Gradiente de conductor.....	22
2.3.6. Diámetro del conductor .....	23
2.3.7. Número de conductores .....	23
2.3.8. Ecuación general DC .....	24
2.4. Evaluación de pérdidas corona [5].....	24
2.4.1. Parámetros que influyen en el fenómeno corona .....	24
2.4.2. Resultados experimentales [5].....	25
2.4.3. Síntesis de los datos experimentales.....	26
2.4.4. Expresiones analíticas de pérdidas corona .....	27
2.4.5. Comparación con resultados experimentales .....	28
2.4.6. Comparación de otras expresiones semi empíricas con resultados experimentales	28
2.5. Radiointerferencia [7] .....	30

2.6.	Campo magnético [1] [2].....	32
2.6.1.	Efecto del terreno; conductor imagen.....	33
2.7.	Marco normativo para las magnitudes de Campo Eléctrico y Magnético .....	34
2.7.1.	Normas de Campo Magnético [11] .....	34
2.7.2.	Normas de Campo Eléctrico estático [11] [12] .....	35
3.	Desarrollo de la memoria .....	38
3.1.	Dificultades encontradas en el proceso.....	43
4.	Discusiones y validación del modelo .....	44
4.1.	Grado de validez de los supuestos .....	44
4.2.	Validación del método [3] .....	44
4.3.	Resultados de las simulaciones.....	51
4.3.1.	Campo eléctrico.....	51
4.3.2.	Radio Interferencia .....	56
4.3.3.	Pérdidas Corona.....	57
4.3.4.	Ruido audible.....	57
4.3.5.	Campo magnético .....	57
4.3.6.	Densidad de carga espacial.....	59
5.	Conclusiones y Trabajo Futuro .....	63
6.	Referencias .....	66
7.	Anexos.....	1
	ANEXO A: Código de la función “ <i>main</i> ”. .....	1

## Índice de tablas

Tabla 2.1	Parámetros de líneas DC. ....	21
Tabla 2.2:	Diámetros equivalentes calculados para distintas líneas DC. ....	24
Tabla 2.3:	Nivel de voltaje, nivel de gradiente máximo y geometría de línea aérea bipolar. ....	26
Tabla 2.4:	Parámetros para la ecuación (43) dados por Maruvada [5].....	29
Tabla 2.5:	Comparación entre el nivel de RI calculado y medido [7].....	32
Tabla 2.6:	Restricciones básicas aplicadas a varias regiones del cuerpo. ....	36
Tabla 2.7:	Campo Eléctrico medioambiental, exposición de cuerpo entero. ....	37

## Índice de figuras

Figura 1.1: Conexión Monopolar (retorno por tierra). .....	3
Figura 1.2: Conexión Bipolar. ....	3
Figura 2.1: Línea de flujo del Campo Eléctrico. ....	10
Figura 2.2: Nomenclatura de los polos. ....	12
Figura 2.3: Tipos de conexión a estudiar. ....	12
Figura 2.4: Distribución de un ruido A-ponderado y de 8 kHz a 15m del polo positivo a 533kV [6]. ....	17
Figura 2.5: Espectro de frecuencia de la octava banda [6]. ....	18
Figura 2.6: Variación de RA A-Ponderado y de 8kHz con líneas dc con gradiente de superficie máximo. ....	22
Figura 2.7: Comparación entre niveles de pérdidas corona medidos y estimados para a: buen tiempo; b: mal tiempo [5]. ....	28
Figura 2.8: Comparación entre datos estimados y medidos [5]. ....	30
Figura 3.1: Esquema del programa implementado. ....	39
Figura 3.2: Captura de Pantalla del programa, solicitando los parámetros de operación uno por uno. ....	39
Figura 3.3: Captura de pantalla del programa una vez recopilados los datos ingresados por el usuario. ....	40
Figura 3.4: Captura de pantalla del programa una vez realizados los cálculos. ....	40
Figura 3.5: Dimensiones de la línea de transmisión para la que se realizaron los cálculos. ....	42
Figura 4.1: Dimensiones de la línea de transmisión de prueba. ....	45
Figura 4.2: Valor medido V/s estimado para el tipo de conexión 1 [3]. ....	46
Figura 4.3: Resultado de la simulación para el tipo de conexión 1, a 1 m del suelo. ....	47
Figura 4.4: Valor medido V/s estimado para el tipo de conexión 2 [3]. ....	47
Figura 4.5: Resultados de la simulación a 1 m del suelo, para la conexión tipo 2. ....	48
Figura 4.6: Valor medido V/s estimado para el tipo de conexión 3 [3]. ....	48
Figura 4.7: Resultados de la simulación a 1 m del suelo, para la conexión tipo 3. ....	49
Figura 4.8: Valor medido V/s estimado para el tipo de conexión 4 [3]. ....	49
Figura 4.9: Resultado de la simulación a 1 m del suelo, para la conexión tipo 4. ....	50
Figura 4.10: Resultado de la simulación para el campo eléctrico ionizado en el espacio, según el tipo de conexiones de los polos. ....	51
Figura 4.11: Perfiles de Campo Eléctrico ionizado para los 4 tipos de conexiones, en V/m, a 1 metro sobre el suelo. ....	52
Figura 4.12: Campo eléctrico al centro de la línea de transmisión para los distintos tipos de conexiones (23.25 m). ....	53
Figura 4.13: Magnitudes de Campo Eléctrico ionizado a 40 metros por sobre el nivel del suelo. ....	54
Figura 4.14: Magnitud del Campo Eléctrico ionizado a 100 metros sobre el suelo. ....	55
Figura 4.15: Valores de campo eléctrico estimados con distintos métodos para el caso de un solo bipolo en la línea [15]. ....	56
Figura 4.16: Resultado del cálculo del Campo Magnético. ....	58
Figura 4.17: Campo Magnético a distintas alturas sobre el nivel del suelo. ....	58
Figura 4.18: Densidades de carga espacial para los distintos tipos de conexión. ....	59
Figura 4.19: Densidad de carga a 1 metro sobre el suelo. ....	60
Figura 4.20: Densidad de carga al centro de la línea de transmisión. ....	61
Figura 4.21: Densidad de carga a 40 metros sobre el suelo. ....	62

Figura 4.22: Densidad de carga a 100 metros sobre el suelo. .... 63

# 1. Introducción

Chile es un país con una geografía única en el mundo, una larga y angosta faja de tierra que, debido a su extensión, presenta diversos climas a lo largo del territorio. Esto determina la naturaleza de la matriz energética en el país, la que se adecúa a las posibilidades que cada región del territorio entrega.

Es por esto que en la zona centro-sur del país se está comenzando a desarrollar de manera más explosiva la energía generada en centrales hidroeléctricas, con el fin de sacar el máximo provecho a los lechos fluviales de la zona.

Sin embargo, en la zona central del país, en particular en la Región Metropolitana, la capacidad de generación de energía eléctrica se ve reducida producto del explosivo aumento en la población, lo que reduce la cantidad de lugares en donde construir una central generadora, además de que se produce un aumento en la demanda de energía eléctrica en la zona. Este hecho hace que sea necesario obtener energía eléctrica en otras regiones que si tienen la capacidad de generar la cantidad de energía necesaria para abastecer los consumos de la población. Sin embargo, estos afluentes hidrológicos y los centros de generación de energía asociados a ellos se encuentran a demasiada distancia del consumo, debido a la extensión del territorio, por lo que se debe recurrir a la transmisión mediante líneas en Corriente Continua de Alto Voltaje (HVDC) para transportar la energía generada, dadas las ventajas técnicas y económicas que presenta este sistema de transferencia de energía frente a líneas de transmisión en Corriente Alterna de Alto Voltaje (HVAC), debido a que, en largas distancias, en estos sistemas las pérdidas son mayores con respecto a las pérdidas producidas en una línea de transmisión en HVDC.

En los sistemas HVDC la energía eléctrica se toma de una red trifásica en alterna, se transforma en tensión continua en una estación convertidora, se trasmite hasta el punto receptor, es vuelta a transformar en tensión alterna en otra estación convertidora y es reinyectada en la red alterna receptora. Las instalaciones HVDC suelen transmitir potencias superiores a 100 MW, muchas están en el rango de 1000 a 3000 MW. Las transmisiones HVDC se usan para transportar energía a largas y muy largas distancias, porque es entonces cuando su coste económico es menor que para líneas tradicionales de alterna. Las distancias involucradas en estas transmisiones suelen ser de 300 a 1400 km. (en tierra) y de 10 a 800 km (para cables submarinos), pero sin embargo no es extraño que estas distancias se vean superadas en algunas instalaciones. Los sistemas HVDC permiten controlar de forma rápida y precisa el flujo de energía controlando tanto los niveles de potencia como la dirección del flujo. Esta posibilidad se suele usar para mejorar el funcionamiento y la eficiencia de las redes alternas que se interconectan.

Existen tres categorías diferentes en las transmisiones HVDC:

**1.- Transmisiones Punto a punto**, se puede diferenciar entre: *HVDC Unipolar*, que utiliza una única línea de alta tensión para la transmisión, como camino de retorno se usa la tierra o, a



veces, un conductor de baja tensión, que es usada en sistemas de hasta 1500 MW, generalmente en instalaciones de cable submarino.

*HVDC Bipolar*, que utiliza dos líneas con polaridades positiva/negativa para la transmisión, esta transmisión bipolar realmente es una transmisión de doble circuito, permitiendo que un terminal siga transmitiendo aun cuando el otro está fuera de servicio. Maneja potencias de 500 a 3000 MW, y la mayoría de las líneas aéreas de HVDC son de este tipo. Además existen varias formas distintas de operar el sistema lo que permite su utilización incluso en caso de fallo o avería de parte de la red.

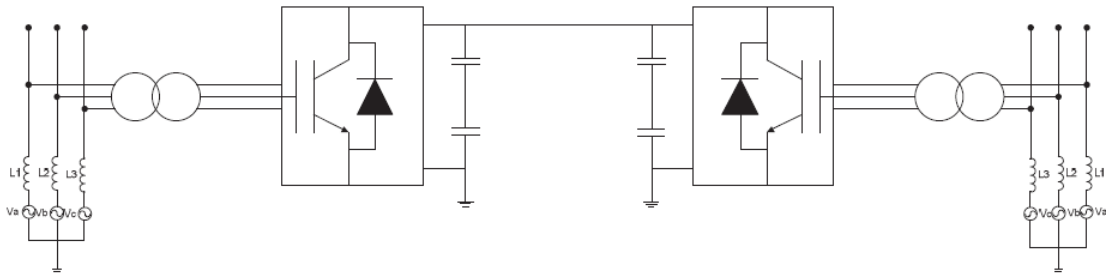
## **2.-Conexiones Back-To-Back**

Una central HVDC Back-To-Back se suele usar para crear una interconexión asíncrona entre dos redes de alterna. En el mundo hay funcionando varias centrales back-to-back. En estas instalaciones tanto el rectificador como el inversor están localizados en la misma central y se usan para crear la interconexión asíncrona entre las redes de alternas, que pueden funcionar a la misma o a diferentes frecuencias. Generalmente una central back-to-back es más sencilla que una central convertidora de un proyecto de transmisión. El nivel de tensión puede ser seleccionado sin tener consideración de cual sería el valor óptimo en la línea aérea o cable usado, y normalmente suele ser bastante bajo, 150 kV o menor. El equipo de control puede ser también simplificado, porque no es necesaria ninguna línea de comunicación entre los dos convertidores.

## **3.-Sistemas multiterminal**

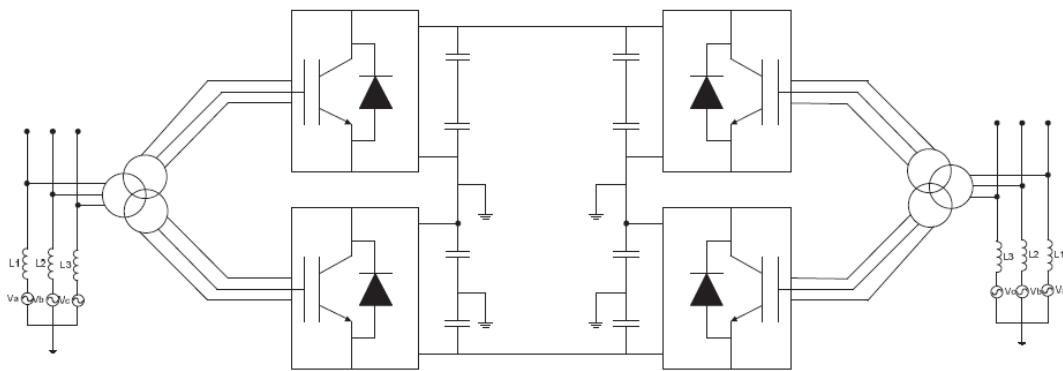
Una transmisión multiterminal HVDC suele ser más compleja que una conexión punto a punto ordinaria, particularmente por que el sistema de control debe ser más elaborado y las necesidades de comunicación entre los convertidores es mayor. Actualmente existen pocos sistemas multiterminal de gran tamaño funcionando en el mundo. El más importante es la conexión entre Québec y New England, construida entre 1987 y 1992, que transmite 2000 MW entre 5 centrales distribuidas a lo largo de casi 1500 km.

Profundizando un poco más en los tipos de conexiones de polaridades en líneas de transmisión HVDC, las conexiones monopolares utilizan un solo conductor para transmitir la energía eléctrica entre las estaciones conversoras. Dicha conexión puede tener retorno por tierra o por cable.



**Figura 1.1: Conexión Monopolar (retorno por tierra).**

La conexión bipolar, tiene una capacidad de potencia mayor que una conexión monopolar, es el tipo de conexión más implementado actualmente en los sistemas de HVDC, basados en líneas aéreas. Esta conexión está conformada por dos sistemas monopolares independientes que hacen las veces de polos positivo y negativo, con la capacidad y/o ventaja de poder funcionar independientemente en caso que alguno de ellos falle.



**Figura 1.2: Conexión Bipolar.**

Por otra parte, una línea de transmisión en HVDC doble circuito de dos niveles paralelos al suelo no es mayormente utilizada en este tipo de instalaciones, contrario a lo que ocurre en las líneas en HVAC, donde el uso de este tipo de estructuras es prácticamente un estándar y una obligación, ya que se contrarrestan efectos de inducción en los conductores de uno y otro circuito.

Variaciones de estas configuraciones son los sistemas de 3 polos y los sistemas de 4 polos. La primera, corresponde a las líneas de transmisión en las que conviven 3 conductores. Dos de ellos forman una conexión bipolar, mientras que el tercer conductor forma parte de un esquema monopolar, con retorno por tierra, y que no necesariamente tiene la misma tensión que los conductores que forman la conexión bipolar.

Por otra parte, los sistemas con 4 polos corresponden a dos circuitos que forman conexiones bipolares, usualmente de la misma tensión, y que operan de manera independiente el uno del otro.

Con respecto a los efectos que se estudiarán con este modelo, un campo electromagnético es un campo físico, de tipo tensorial, producido por aquellos elementos cargados eléctricamente, que afecta a partículas con carga eléctrica.

El efecto corona es un fenómeno eléctrico que se produce en los conductores de las líneas de alta tensión y se manifiesta en forma de halo luminoso a su alrededor. Dado que los conductores suelen ser de sección circular, el halo adopta una forma de corona, de ahí el nombre del fenómeno.

El efecto corona está causado por la ionización del aire circundante al conductor debido a los altos niveles de tensión de la línea. En el momento que las moléculas de aire se ionizan, éstas son capaces de conducir la corriente eléctrica y parte de los electrones que circulan por la línea pasan a circular por el aire. Tal circulación producirá un incremento de temperatura en el gas, que se tornará de un color rojizo para niveles bajos de temperatura, o azulado para niveles altos. La intensidad del efecto corona, por lo tanto, se puede cuantificar según el color del halo, que será rojizo en aquellos casos leves y azulado para los más severos.

Esta ionización de las partículas del aire genera un intercambio de partículas ionizadas de aire con partículas no ionizadas, produciendo una compresión y descompresión muy rápida de la capa de aire que rodea a los conductores. Esto genera un zumbido, o ruido audible.

La interferencia electromagnética es la perturbación que ocurre en cualquier circuito, componente o sistema electrónico causada por una fuente de radiación electromagnética externa al mismo. Esta perturbación puede interrumpir, degradar o limitar el rendimiento de ese sistema. La fuente de la interferencia puede ser cualquier objeto, ya sea artificial o natural, que posea corrientes eléctricas que varíen rápidamente, como un circuito eléctrico, líneas de transmisión, el sol o las auroras boreales.

Es por esto que el desarrollo de un modelo computacional que permita la estimación de los efectos que generan en su entorno las líneas de este tipo se hace necesario, ya que, si bien en otros lugares del mundo como China y Brasil ya tienen experiencia trabajando con este tipo de proyectos, este tipo de tecnología recién se está “masificando” en el mundo, y en Chile en particular, el tema aún se encuentra en pañales, tratando de replicar la experiencia internacional al respecto.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo General**

Generar un modelo que permita estimar el valor de los campos eléctricos y magnéticos generados por una línea aérea de cuatro polos en HDVC, además del nivel de ruido audible y de interferencia electromagnética producidos por dicha línea.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Desarrollar un modelo que sea capaz de estimar la magnitud de campos eléctricos y magnéticos generados en torno a una línea de transmisión HVDC de cuatro polos.
- Estimar magnitud de ruido audible.
- Estimar magnitud de la interferencia en comunicaciones de radio y televisión.

## **1.2. Alcance de la memoria**

El alcance de este trabajo es el de realizar un modelo de la línea aérea de 4 cuatro polos (dos polos positivos y dos negativos) en HVDC, que conectará la subestación convertidora rectificadora en Aysén con la subestación convertidora inversora en Puerto Montt o Santiago, para toda la extensión de la línea en su tramo aéreo, sin tomar en cuenta el tramo submarino de dicha línea, ni sus conexiones a tierra o las subestaciones a lo largo de la misma.

## **1.3. Estructura del trabajo y metodología**

En el Capítulo 2 se darán a conocer los métodos, supuestos realizados y fundamentos teóricos en los que se basa este trabajo.

En el Capítulo 3 se mostrará la metodología seguida para el desarrollo del software que se busca implementar, principalmente, en lo referente al campo ionizado. Además, se describirán las dificultades encontradas en el proceso, y como éstas fueron resueltas.

En el Capítulo 4 se realizará la validación del modelo obtenido, comparándolo con resultados experimentales obtenidos en laboratorios internacionales, además de discutir la validez de los supuestos realizados, y de los métodos escogidos.

En el Capítulo 5 se concluye acerca del trabajo realizado, y se plantea el trabajo a futuro concerniente a mejorar lo hecho en este proyecto.

## **2. Antecedentes**

La tecnología HVDC ya ha sido implementada con éxito en varias partes del mundo, sobre todo en países en los que las distancias entre los centros de generación y los consumos son importantes, como China, Brasil y Canadá, entre otros.

Sin embargo, todos estos proyectos, o la gran mayoría de ellos, son instalaciones de un bipolo, es decir, solo poseen un conductor, o arreglo de conductores, por polaridad, o simplemente monopolo, o sea, solo poseen un arreglo de conductores con polaridad positiva, realizando el retorno por tierra, dependiendo de las características del terreno.

En la actualidad, en el país existen varios proyectos en carpeta que recurrirán a sistemas de transmisión de energía eléctrica en Alta Tensión en Corriente Continua (HVDC), como por ejemplo la interconexión entre el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y el Sistema Interconectado Central (SIC), el cual ya se encuentra en etapa de concesión, para su posterior realización. Existe además la intención de interconectar la matriz energética del país con los países vecinos, principalmente con Argentina, en cuyo caso también este enlace se realizaría en HVDC. Por otra parte, el proyecto Sistema de Transmisión Aysén (STA) de Centrales Hidroeléctricas de Aysén S.A., HVDC, con voltaje nominal  $\pm 500$  kV está destinado a transmitir los 2.700 MW generados en las centrales del Proyecto Hidroeléctrico Aysén, a la zona central del país.

En este capítulo se analizará el campo eléctrico generado por el tramo aéreo de una línea de transmisión en HVDC. Para ello, existen una serie de métodos y modelos para estimar los efectos que aquí se estudiarán, por lo que a continuación se procederá a describir aquellos que se utilizaron para la realización del modelo computacional implementado.

### **2.1. Historia de los Sistemas de Transmisión en HVDC [14]**

En la Historia de la industria eléctrica la primera vez que se generó electricidad comercialmente (Thomas Alva Edison) fue corriente continua (DC). Los primeros sistemas de transmisión también eran de continua. Sin embargo, la energía que proporcionaban los sistemas DC no podía ser transmitida a largas distancias, lo que provocó el crecimiento de la tecnología de corriente alterna. Con el desarrollo de las válvulas de alto voltaje fue de nuevo posible transmitir corriente continua a altos voltajes y a largas distancias, esto fue el inicio del desarrollo de los sistemas de transporte HVDC.

El desarrollo de la tecnología HVDC comenzó a finales de los años 20, y durante los posteriores 25 años hubo un extenso desarrollo que culminó en 1954 cuando se inauguró la primera instalación comercial. Una mejora sensible se produjo en los 70 cuando aparecieron los tiristores. Actualmente novedosas tecnologías están siendo utilizadas.

Veamos los hechos históricos más importantes que han favorecido el desarrollo de HVDC:

- En 1901 aparecen los rectificadores de mercurio-vapor de Hewitt.

- Hasta 1940 se realizaron diversos experimentos con válvulas de arco de mercurio en

Europa. De entre todos cabe resaltar los resultados obtenidos por el Dr. Uno Lamm, también conocido como "el padre de HVDC". El principal problema durante estos años era el desarrollo de válvulas que fuesen fiables y económicas y que pudiesen convertir corriente alterna de alto voltaje en corriente continua y viceversa. Los experimentos realizados hasta el momento con dispositivos de contactos mecánicos móviles no resultaron exitosos. Por otra parte, las válvulas de arco de mercurio proporcionan nuevas líneas de investigación. Mientras que las máquinas eléctricas, transformadores, etc. pueden ser diseñadas con gran precisión con la ayuda de leyes físicas formuladas matemáticamente, el diseño de las válvulas de arco de mercurio estaba basado en un conocimiento adquirido empíricamente. El problema fue resuelto en 1929 en un artículo que posteriormente fue patentado y que puede considerarse la piedra de toque del desarrollo de las válvulas de arco de mercurio para altos voltajes. Fue en 1944 cuando el Dr. Uno Lamm consiguió operar en el laboratorio un rectificador y un inversor de DC sobre una carga de 2000 kW utilizando voltajes de 60 kV.

- Primera transmisión comercial, enlace Gotland (1954). Antes de este hecho, una central de prueba fue construida en 1945 entre el ministerio sueco de energía y la ASEA. Se trataba de una línea de 50 km que era usada para pruebas. Fue en 1950 cuando el ministerio Sueco llegó a un acuerdo con ASEA para la construcción de la que llegaría a convertirse en la primera línea comercial para transporte de energía en continua. El enlace Gotland uniría la isla de Gotland con Suecia. No fue hasta 1953 cuando se resolvieron los problemas concretos que presentaba el diseño de las válvulas de arco de mercurio. El enlace Gotland comenzó entonces, ya 1954, a transmitir energía con una potencia de 20 MW, 200 A y 100 kV. El diseño de otros componentes de las centrales convertidoras, como transformadores, reactancias o equipamiento de protección y control, tuvo lugar al mismo tiempo que el desarrollo de las válvulas de arco de mercurio. Los conocimientos en sistemas de AC eran sólo aplicables parcialmente, lo que provocó la aparición de nuevas técnicas para el desarrollo de estos sistemas. Estas nuevas técnicas se desarrollaron con el uso de métodos matemáticos y simuladores analógicos.

-La aparición de los tiristores en los años 70 marcará de nuevo la historia de HVDC. En la primavera de 1967 una de las válvulas de arco de mercurio del enlace Gotland fue remplazada por un tiristor, fue la primera vez que se usaba un tiristor con efectos comerciales. Después de casi un año de funcionamiento, el Ministerio Sueco de energía efectuó la instalación de cable submarino, Gotland, en los años 50, decidió instalar un grupo completo de válvulas nuevas para cada convertidor, utilizando tiristores y aumentando de esta forma la capacidad del enlace en un 50%. El nuevo grupo de válvulas fue conectado en serie con los dos grupos de válvulas de arco de mercurio ya existentes, de esta forma se consiguió pasar de un voltaje de 100 kV a 150 kV. Este hecho se logró en la primavera de 1970, siendo de nuevo el enlace Gotland el pionero. Los

tiristores han hecho posible simplificar las centrales convertoras, y por tanto, se usaron a partir de este momento de forma generalizada.

-En 1979 se aplicó el primer control basado en microcomputador en una instalación HVDC. El control de los sistemas HVDC ha ido en paralelo al desarrollo de los microcomputadores.

-En 1984 se puso en funcionamiento el enlace de mayor tensión hasta el momento. Se trata de la conexión en Itaipú, Brasil. Con un voltaje de aprox. 600 kV y unos 6000 MW de potencia, este enlace de mas de 1500 km proporciona energía a la ciudad de Sao Paulo.

-En 1994 se utilizan por primera vez de forma comercial filtros activos de continua. El principio de funcionamiento de estos filtros es el inyectar una corriente generada por un amplificador en el circuito de continua y de esta forma cancelar los armónicos que proceden del convertidor HVDC. El amplificador es controlado por un procesador de señal de alta velocidad.

-La instalación del primer convertidor de capacidades conmutadas (CCC) en 1998 en la interconexión Argentina-Brasil es de nuevo un hecho importante en la historia reciente de HVDC. El uso de convertidores de capacidades conmutadas ha hecho posible una mejora significativa en los circuitos convertidores tradicionales de HVDC, las capacidades conmutadas se conectan entre el puente de válvulas y los transformadores del convertidor consiguiéndose mejoras en la estabilidad dinámica y mayor robustez ante las perturbaciones.

-En 1999 de nuevo el enlace Gotland aparece en la historia de HVDC, esta vez por la instalación del primer convertidor conmutado de tensión (VSC) para transporte de energía. Los convertidores tradicionales se basaban en conmutación de línea o de fase, estos nuevos convertidores utilizan PWM junto con dispositivos de alta frecuencia, como IGBT, consiguiendo mejoras considerables en diversos aspectos de funcionamiento.

## **2.2. Método de cálculo del Campo Eléctrico en una línea HVDC de doble circuito [3]**

Este método se utiliza para analizar los efectos de diversos arreglos de polos, en lo que se refiere al campo eléctrico ionizado. A continuación se detalla el procedimiento de cálculo.

$$\nabla \cdot E_s = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad 2.1.$$

$$J = K\rho E_s \quad 2.2.$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad 2.3.$$

Con  $E_s$  el campo eléctrico con presencia de carga espacial,  $\rho$  la densidad de carga espacial,  $J$  es la densidad de corriente ionizada,  $\epsilon_0$  es la permitividad del aire, y  $K$  es la movilidad iónica.

Con el fin de resolver estas ecuaciones, se hacen los siguientes supuestos:

1. En la misma torre existen tanto iones positivos como negativos sobre el suelo.
2. La carga espacial afecta solo la magnitud del campo eléctrico, no la dirección.
3. La movilidad de los iones es constante, y la difusión térmica de los iones se desprecia.
4. El campo eléctrico en la superficie del polo en corona se mantiene constante, y se desprecia el espesor de la capa de iones.

Por lo tanto, si  $E$  es el campo eléctrico libre de carga espacial, se tiene que

$$E_s = AE \quad 2.4.$$

Donde  $A$  es una función escalar de las coordenadas espaciales, y depende de la distribución espacial de carga.

Sean  $\phi$  el potencial con presencia de carga espacial, y  $\varphi$  el potencial en ausencia de ella. Se tiene, entonces, la siguiente relación entre potenciales y campos eléctricos.

$$E = -\nabla\varphi \quad 2.5.$$

$$E_s = -\nabla\phi \quad 2.6.$$

Lo que se puede reescribir como

$$E = -\frac{d\varphi}{ds} \quad 2.7.$$

$$E_s = -\frac{d\phi}{ds} \quad 2.8.$$

Donde  $s$  representa la distancia a lo largo de la línea de flujo.



De 2.4, 2.7 y 2.8 se obtiene que

$$d\varphi = \frac{d\phi}{A} \quad 2.9.$$

De 2.1 y 2.4, y del hecho que  $\nabla \cdot E = 0$

$$E \cdot \nabla A = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad 2.10.$$

A lo largo de la línea de flujo se tiene

$$\frac{ds}{dA} = \frac{\epsilon_0 E}{\rho} \quad 2.11.$$

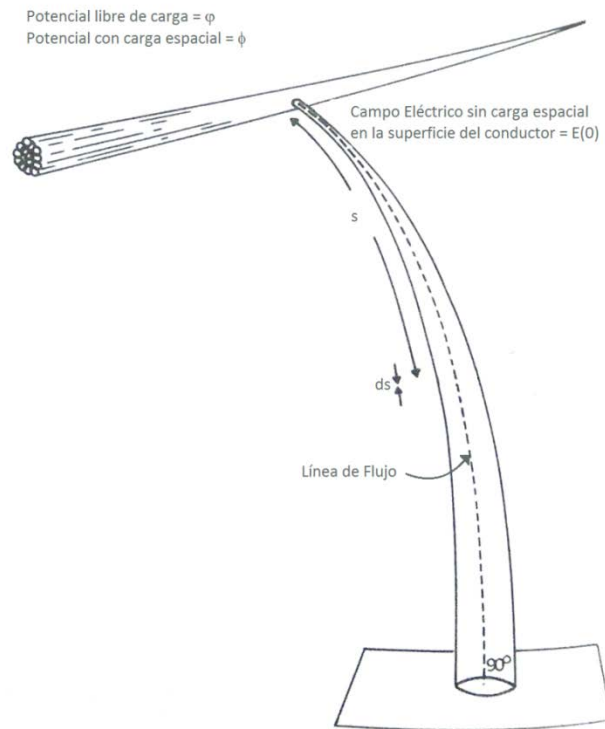


Figura 2.1: Línea de flujo del Campo Eléctrico.

Sustituyendo  $ds$  desde 2.7

$$\frac{d\varphi}{dA} = -\frac{\epsilon_0 E^2}{\rho} \quad 2.12.$$

Desde 2.1-2.4

$$AE\nabla\rho = \frac{\rho^2}{\epsilon_0} \quad 2.13.$$

Nuevamente a lo largo de la línea de flujo

$$\frac{ds}{d\rho} = -\frac{(A\epsilon_0 E)}{\rho^2} \quad 2.14.$$

Y nuevamente sustituyendo  $ds$

$$\frac{d\varphi}{d\rho} = \frac{A\epsilon_0 E^2}{\rho^2} \quad 2.15.$$

Luego, el campo eléctrico sobre la superficie del suelo bajo una línea de transmisión aérea HVDC doble circuito se puede calcular usando 2.9, 2.12 y 2.15, e imponiendo las siguientes condiciones de borde

$$\begin{aligned} \varphi &= 0 \text{ y } \phi = 0 \text{ en el suelo} \\ \varphi &= \phi = V_n \text{ en la superficie del polo} \\ A &= A_n = \frac{V_{0n}}{V_n} \text{ en la superficie del polo} \end{aligned} \quad 2.16.$$

Donde  $n$  es el número serial de cada polo de la línea en la misma torre, y va de 1 a 4,  $V_n$  es el voltaje aplicado en el polo  $n$ , y  $V_{0n}$  es el voltaje de inicio de corona de cada polo.

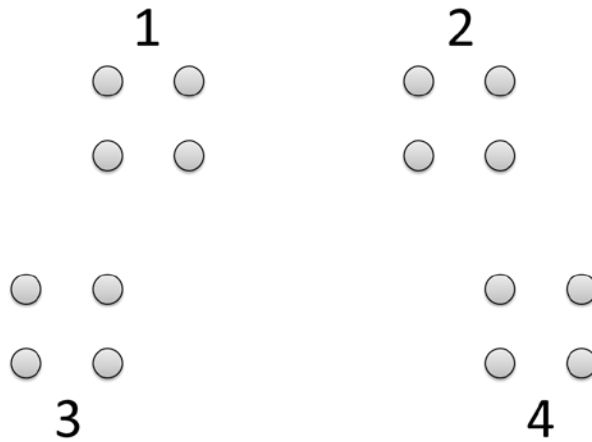


Figura 2.2: Nomenclatura de los polos.

De las ecuaciones anteriores, se puede ver que obtener el voltaje de inicio de corona es muy importante, si lo que se quiere es calcular el campo eléctrico sobre la superficie del suelo bajo la línea de transmisión antes mostrada, por lo que a continuación se mostrará el procedimiento para calcularlo.

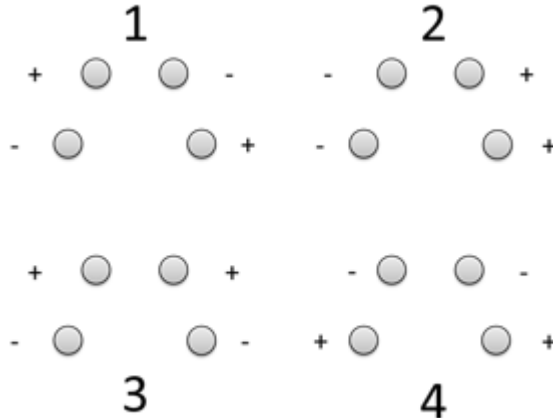


Figura 2.3: Tipos de conexión a estudiar.

### 2.2.1. Voltaje de inicio de corona para cada polo

Debido a que el corredor necesario para una línea de transmisión en HVDC cuyos polos se encuentran en el mismo nivel es mucho más ancho y menos usado que la configuración mostrada en la figura 2.2, es que el caso de estudio en este trabajo se centrará en esta última configuración.

Esta aclaración es importante de realizar, toda vez que la configuración geométrica de los polos en la torre es determinante tanto en el voltaje de inicio de corona como en el campo eléctrico, y por ende, en el resto de las variables que se busca determinar.

Por otra parte, el orden en el que cada polo es configurado en la torre también es determinante, por lo que se analizarán los 4 casos mostrados en la figura 2.3.

El campo eléctrico sobre la superficie del terreno bajo una línea de transmisión HVDC doble circuito se produce tanto por la carga en los polos como por la carga espacial producida por el efecto corona. La componente producida por la carga espacial está muy relacionada a varios grados de descarga corona en la superficie de cada polo. Un factor importante que afecta este grado de descargas corona es la proporción del campo de inicio de corona de este polo con el campo eléctrico libre de carga espacial en la superficie de dicho polo, y esta proporción es igual a la proporción del potencial de inicio de corona con el potencial aplicado al polo.

Por cada polo de la línea de transmisión, cuando la suma de su voltaje aplicado y el voltaje en la superficie inducido por los otros polos llega al potencial de inicio de corona, la descarga corona comenzará en la superficie del polo. Si se considera la configuración geométrica de la línea de transmisión y las interacciones entre todos los polos, factores importantes que afectan el voltaje de inicio de corona de cada polo se muestran a continuación.

- 1) Cuando se considera el efecto de la tierra, la altura de cada polo afectará el respectivo voltaje de inicio de corona.
- 2) Dado que cada polo inducirá un voltaje en la superficie del resto de los polos, el voltaje de inicio de corona se verá afectado por las locaciones geométricas relativas de los polos.
- 3) Una vez fijada la configuración geométrica de los polos, las diferentes polaridades de cada uno también serán un factor a tener en cuenta.

O sea, para cada configuración polar, para cada polo deberá ser calculado separadamente el voltaje de inicio de corona.

En el caso de una línea de transmisión real, se utilizan conjuntos de conductores en cada polo, los que pueden ser remplazados por un conductor equivalente, el que permitirá, a través del método de Peek, calcular el voltaje de inicio de corona de la línea. En la práctica, el campo eléctrico varía entre un punto y otro de la superficie del conductor, y también de un subconductor a otro. Sin embargo, se utiliza el método de las imágenes para calcularlo y analizarlo. Por lo tanto, cuando el promedio de los valores máximos del campo eléctrico en cada subconductor de un polo llega al nivel corona, el voltaje aplicado de este polo se puede considerar el voltaje de inicio de corona.

Luego, sea  $A_n$  el valor de  $A$  en la superficie del polo  $n$ , entonces se tiene lo siguiente.

$$A_n = \left| \frac{E_{on_n}}{\overline{E_{maximo_n}}} \right| \quad 2.17.$$

Donde  $\overline{E_{maximo_n}}$  es el promedio de los valores máximos de campo eléctrico en cada superficie de cada subconductor,  $E_{on_n}$  es el campo de inicio de corona de cada polo. De esta manera,  $V_{0n}$ , el voltaje de inicio de corona del polo  $n$ , se puede expresar como sigue.

$$V_{0n} = A_n V_n \quad 2.18.$$

### 2.2.2. Cálculo del campo eléctrico sobre la superficie del terreno

Si en un punto  $P(x, y)$  sobre el suelo se calcula el campo eléctrico, y si la línea de flujo que pasa por dicho punto va desde la superficie de un polo a tierra, los parámetros  $A_n$ ,  $V_n$  y  $V_{0n}$  correspondientes a dicho polo se deben seleccionar y usar en las ecuaciones 2.9, 2.12, 2.15 y 2.16.

Para resolver el problema de condiciones de borde definido por dichas ecuaciones a lo largo de la línea de flujo antes descrita, se deben seguir los siguientes pasos.

- 1) El potencial libre de carga  $\varphi_P$  y el campo eléctrico libre de carga  $E_P$  en el punto  $P$ , y la trayectoria de la línea de flujo que transita por dicho punto se obtienen usando el método de las imágenes, para lo que se considera como idealización una línea infinita [2], y también se pueden obtener las coordenadas del punto  $O(x, y)$  en el que la línea intercepta con la superficie de un cierto subconductor del polo  $n$ .
- 2) En el punto  $O$ ,  $A = A_n$ , y puede ser obtenido directamente desde la ecuación 2.17
- 3)  $\rho_{e_1}$  y  $\rho_{e_2}$  son dos valores iniciales de  $\rho$  en el punto  $O$ , y se pueden estimar de acuerdo a lo que se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} \rho_{e_1} &= f_1 \rho_m \\ \rho_{e_2} &= f_2 \rho_m \end{aligned} \quad 2.19.$$

Con  $f_1$  y  $f_2$  constantes positivas. Si se elige  $f_1 = 2$  y  $f_2 = 3$ , se pueden obtener resultados con una precisión relativa de  $10^{-6}$  rápidamente [1] [3], y  $\rho_m$  se puede expresar como se muestra a continuación.

$$\rho_m = \frac{\varepsilon_0 (V_n - V_{0n})}{\int_0^{V_n} \int_\varphi^{V_n} E^{-2} d\eta d\varphi} \quad 2.20.$$

Donde  $\eta$  es la variable de integración del potencial libre de carga a lo largo de la línea de flujo.

- 4) Usando el punto  $O$  con las condiciones de borde  $\rho_{e_1}$  y  $A_n$  como punto inicial, se utiliza el método de Runge-Kutta para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales no lineal compuesto de 2.9, 2.12 y 2.15, con las condiciones de borde expuestas en 2.16, obteniéndose el potencial libre de carga  $\varphi'_{P_1}$  en el punto  $P$ . Lo mismo se realiza con  $\rho_{e_2}$ , con el que se obtiene  $\varphi'_{P_2}$ .
- 5) El valor siguiente de  $\rho$  en el punto  $O$  se puede calcular utilizando la siguiente expresión.

$$\rho_{e_3} = \rho_{e_2} + \frac{\varphi_P - \varphi'_{P_2}}{\varphi'_{P_2} - \varphi'_{P_1}} (\rho_{e_2} - \rho_{e_1}) \quad 2.21.$$

- 6) Para este nuevo valor de  $\rho$  se realiza nuevamente el paso 4, obteniéndose  $\varphi'_{P_3}$ ,  $\phi_{P_3}$  y  $A_{P_3}$ , el valor de  $A$  en el punto  $P$ . Dada la unicidad de la solución para el campo ionizado y el potencial cero en el suelo, si  $\rho_{e_3}$  es el valor de  $\rho$  en el punto  $O$ , las expresiones 2.22 y 2.23 mostradas a continuación se satisfacen de manera simultánea.

$$\left| \frac{\varphi_P - \varphi'_{P_3}}{\varphi_P} \right| < 10^{-6} \quad 2.22.$$

$$\left| \frac{A_P(\varphi'_{P_3} - 0)}{\phi_{P_3}} \right| < 10^{-6} \quad 2.23.$$

Si estas expresiones no se satisfacen de manera simultánea,  $\rho_{e_1}$  y  $\rho_{e_2}$  toman los valores de  $\rho_{e_2}$  y  $\rho_{e_3}$  respectivamente, y se repiten los pasos 4 a 6, hasta que ambas expresiones se satisfagan de manera simultánea, lo que garantizará que las condiciones de borde establecidas en 2.16 se satisfarán.

- 7) Una vez obtenidos los valores de  $A_P$  y  $E_P$ , el campo eléctrico ionizado en el punto  $P$  se puede obtener mediante la expresión 2.4.

### 2.3. Fórmulas para predecir el ruido audible [1] [6]

Este método provee un cálculo más preciso de ruido audible (RA) que las fórmulas generales.

De cualquier forma, muchas veces los cálculos se deben realizar para líneas en donde los datos históricos de diseños y condiciones climáticas similares no existen, o el ingeniero diseñador no sabe de su existencia, por lo que una fórmula general será más poderosa [1].

### **2.3.1. Distribución acumulativa de probabilidad**

Para líneas AC, las distribuciones acumulativas de probabilidad para conductores húmedos que se han obtenido tienen una forma común.

Las fórmulas existentes para líneas AC, predicen el ruido durante la lluvia. Una vez predicho dicho ruido, las formas generales de distribución se pueden utilizar para cualquier clima. La distribución bajo lluvia es la más importante para efectos de predicción, ya que la distribución en conductor húmedo depende del clima, ruido ambiente bajo el que se expone la línea, y el efecto de calentamiento de carga de corriente.

La figura 2.4 muestra una distribución nocturna de buen tiempo, obtenida durante octubre de 1978 en un conjunto de dos conductores en el centro de pruebas DC de Dalles [6]. Esta distribución no se puede clasificar como una distribución de largo tiempo. Esta distribución de buen tiempo se corrigió para ruido ambiente como una distribución normal. No existen suficientes datos de RA en líneas dc para determinar si las distribuciones estadísticas de buen tiempo tienen una forma constante. De cualquier modo, los datos de larga data fueron fuertemente influenciados por el ruido ambiente. Hasta que existan más datos, se recomienda la distribución A-ponderada en la figura, como base para el desarrollo de la forma de distribuciones acumulativas de buen tiempo dc.

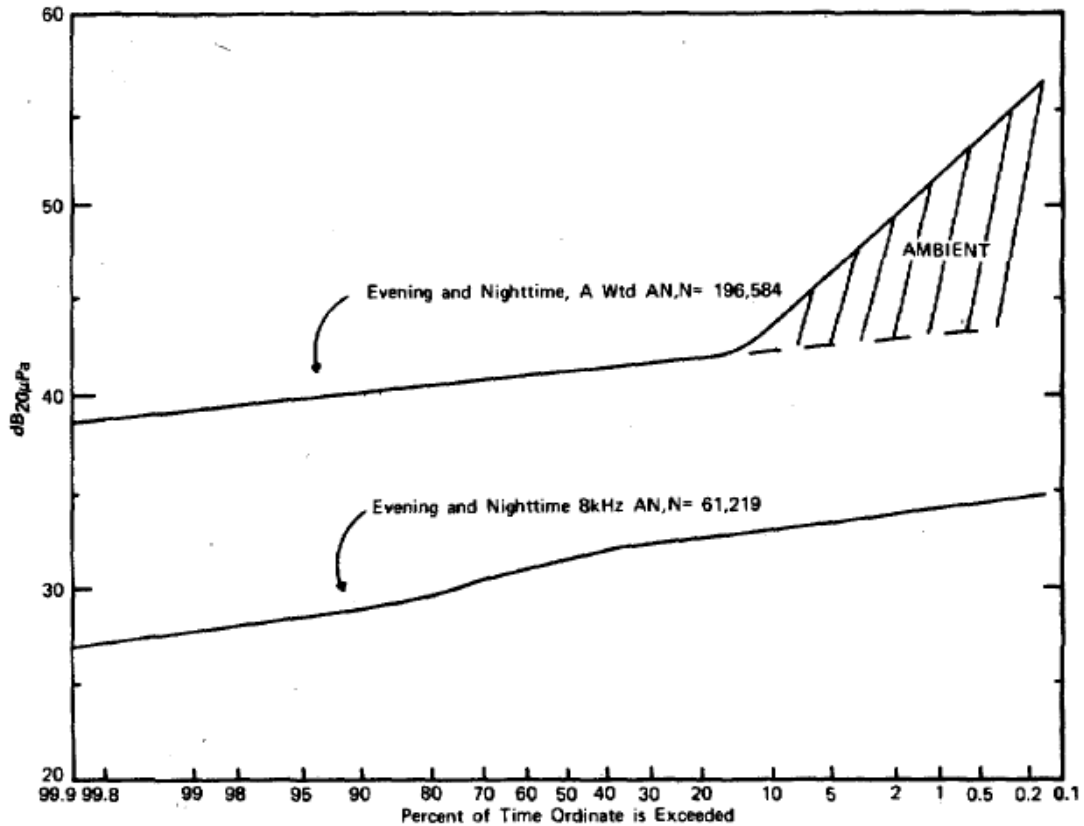


Figura 2.4: Distribución de un ruido A-ponderado y de 8 kHz a 15m del polo positivo a 533kV [6].

### 2.3.2. Espectros de frecuencia

No existen suficientes datos en la literatura para determinar si la forma de los espectros de frecuencia para líneas ac o dc tienen formas independientes del diseño de la línea o el voltaje. De todas formas, la mayoría de las mediciones de la octava banda de espectro de frecuencia sobre los 500 Hz a 15m desde la línea, ha mostrado que para efectos de predicción, el espectro de frecuencia se puede suponer como plano alrededor de los 8kHz. Ningún espectro de frecuencia es perfectamente plano, pero han sido muy similares una vez que las correcciones por diferencias de micrófono se toman en cuenta. Para líneas dc hay muy pocos datos en la literatura. A continuación se muestran datos tomados de una configuración de 2 conductores. Es interesante que, incluso RA dc tomado durante tiempo seco da una respuesta en frecuencia plana desde 1kHz hasta alrededor de 8kHz en los voltajes más elevados.



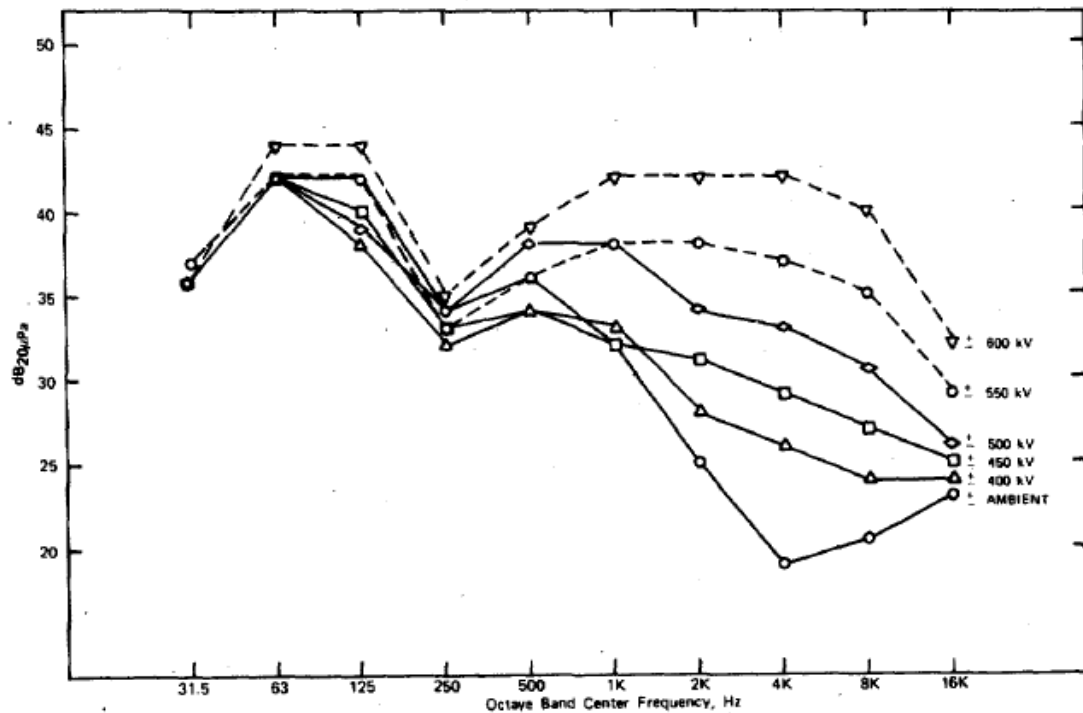


Figura 2.5: Espectro de frecuencia de la octava banda [6].

Basado en esto, la predicción de tonos puros sería infructuosa, además de que experimentos psicoacústicos muestran que el aspecto molesto del ruido corona se debe a crujido de alta frecuencia más que a tonos puros.

### 2.3.3. Propagación de sonido y atenuación

El término necesario para calcular niveles de sonido es el nivel de potencia acústica para cada fase de una línea, y se puede calcular para cualquier fase de cualquier dato de nivel de sonido.

### 2.3.4. Derivación de la ecuación para computar los niveles de potencia acústica para fuente lineal.

La ecuación general para calcular la energía de potencia acústica (intensidad) para una fuente dada es

$$J = \frac{A}{s} \tag{2.24}$$

Con

J: Intensidad de potencia ( $\frac{W}{m^2}$ )

A: potencia generada por la fuente (W)

s: Superficie del área circundante de la fuente ( $m^2$ )

Suponiendo un punto fuente sin obstrucciones cercanas, s es una esfera, por la que la ecuación se transforma en

$$J = \frac{A}{4\pi R^2} \quad 2.25.$$

Donde R es la distancia radial a la fuente (m)

Suponiendo que una fuente lineal se describe como una colección de puntos independientes de fuentes, la energía de potencia acústica (intensidad) para la fuente lineal será la suma de las energías individuales de fuentes puntuales. Así, la ecuación para una fuente lineal (y tomando en consideración las propiedades reflectivas del suelo) se transforma en

$$J = \int \left( \frac{A}{4\pi(R^2 + x^2)} \right) dx + K \int \left( \frac{A}{4\pi(Z^2 + x^2)} \right) dx \quad 2.26.$$

Donde

A: Potencia generada por unidad de longitud del conductor (W/m)

R: distancia radial desde el punto de medición a la línea (m)

Z: distancia desde el punto de medición a la imagen de línea (m)

x: distancia a lo largo del conductor (m)

K: coeficiente de reflexión (se aproxima a 1, el mejor suelo se comporta como un plano perfectamente reflector)

Suponiendo que el punto de medición es cercano a tierra ( $R=Z$ )

$$J = \frac{A(K + 1)}{2\pi R} \tan^{-1} \frac{L}{2\pi R} \quad 2.27.$$

Con

L: Largo de la línea (m)

El nivel de presión de sonido (SPL) se define como

$$SPL = \sqrt{cJ\delta} \quad 2.28.$$

Donde

SPL: Nivel de presión de sonido (Pa)

d: densidad de aire ( $\frac{kg}{m^3}$ ) Ambiente  $d=1.205$  ( $\frac{kg}{m^3}$ )

c=velocidad de propagación de la onda de sonido en el aire (m/s), ambiente  $c=344$ (m/s)

Sustituyendo, queda

$$SPL = \left[ \frac{A\delta(K + 1)}{2\pi R} \tan^{-1} \frac{L}{2R} \right]^{\frac{1}{2}} \quad 2.29.$$

Resolviendo en términos de  $dB_{20\mu Pa}$  y suponiendo  $K=0$ , es decir, el terreno se supone como un buen medio absorbente de sonido.

$$SPL = 10 \log \left( \frac{SPL}{C} \right)^2 \quad y \quad A_{dB} = 10 \log \left( \frac{A}{F} \right) \quad 2.30.$$

$$SPL_{dB} = A_{dB} - 10 \log(R) + 10 \log \left( \tan^{-1} \frac{L}{2R} \right) - 7.8 \quad 2.31.$$

Donde

$$C=20\mu Pa$$

$$F=1 \left( \frac{pW}{m} \right)$$

Para una línea de transmisión, es correcto afirmar que  $\frac{L}{2R} \rightarrow \infty$  y  $\tan^{-1} \infty = \frac{\pi}{2}$

$$SPL_{dB} = A_{dB} - 10 \log(R) - 5.8 \quad 2.32.$$

Esto muestra, teóricamente, que el ruido audible disminuye a medida que se aleja de la línea en razón  $10 \log R$ , donde  $R$  es la distancia radial entre el conductor y el punto de medición. Sin embargo, mediciones en líneas ac muestran que la atenuación A-ponderada es entre 3 a 4 dB por cada doble de distancia o  $10 \log R$  a  $13.3 \log R$ . La atenuación extra se puede deber a la absorción atmosférica, refracción, interferencia con tierra, blindaje, dispersión, o efecto del follaje. De todas formas, si las mediciones se llevan a cabo en un lugar abierto, un día con poco viento, la atenuación extra se debería, principalmente, a la absorción atmosférica. La absorción molecular es el factor más importante en la atmósfera, y se relaciona con la cantidad de vapor de agua en el aire. Los datos existentes muestran que la absorción crece con la disminución de vapor de agua en la atmósfera. En términos de niveles de sonido A-ponderados para la forma de espectro de ruido de línea de transmisión, el incremento en la atenuación debido a absorción en el aire es entre 1 a 7 dB(A) cada 300 m.

A continuación se muestra una tabla con los datos encontrados en la literatura, que se pueden utilizar como referencia para el cálculo de los niveles de RA en líneas similares.

Tabla 2.1 Parámetros de líneas DC.

No. of Conductors	Cond. Diam. (mm)	Line Volt. kV	Pole Spacing (m)	Line Clearance (m)	Conductor Gradient kV/cm	Sound Level Meas. Dist. from Pos. Pole (m)	Measured A-weighted L <sub>50</sub> Level (Fair) dB(A)	Calculated PWL dBpw/m	Season
1	50.4	± 250	7.62	10.8	17.5	0	30	47.6	Fall
2	46.2	± 533	12.2	12.0	27.2	15	42	62.4	Fall
4	30.5	± 600	13.2	13.1	28.0	0	48	66.5	Summer
4	40.7	± 750	13.7	13.7	27.5	15	47	67.7	Fall
6	40.7	± 900	15.2	12.2	25.2	15	50	70.5	Fall
8	45.7	±1050	16.8	12.2	22.0	15	49	69.5	Spring

### 2.3.5. Gradiente de conductor

Se han realizado muchos test de voltaje en líneas de prueba con 2 subconductores de 46.2 mm con un espaciado de 0.456 m, y distancia entre polos de 12.2 m. La distancia a tierra fue de 11.9 m y 12.2 para los polos positivo y negativo, respectivamente. Los resultados se obtuvieron durante la noche, cuando el ruido A-ponderado era menor a 34dB(A), mientras que para el día no se pudieron obtener datos [6].

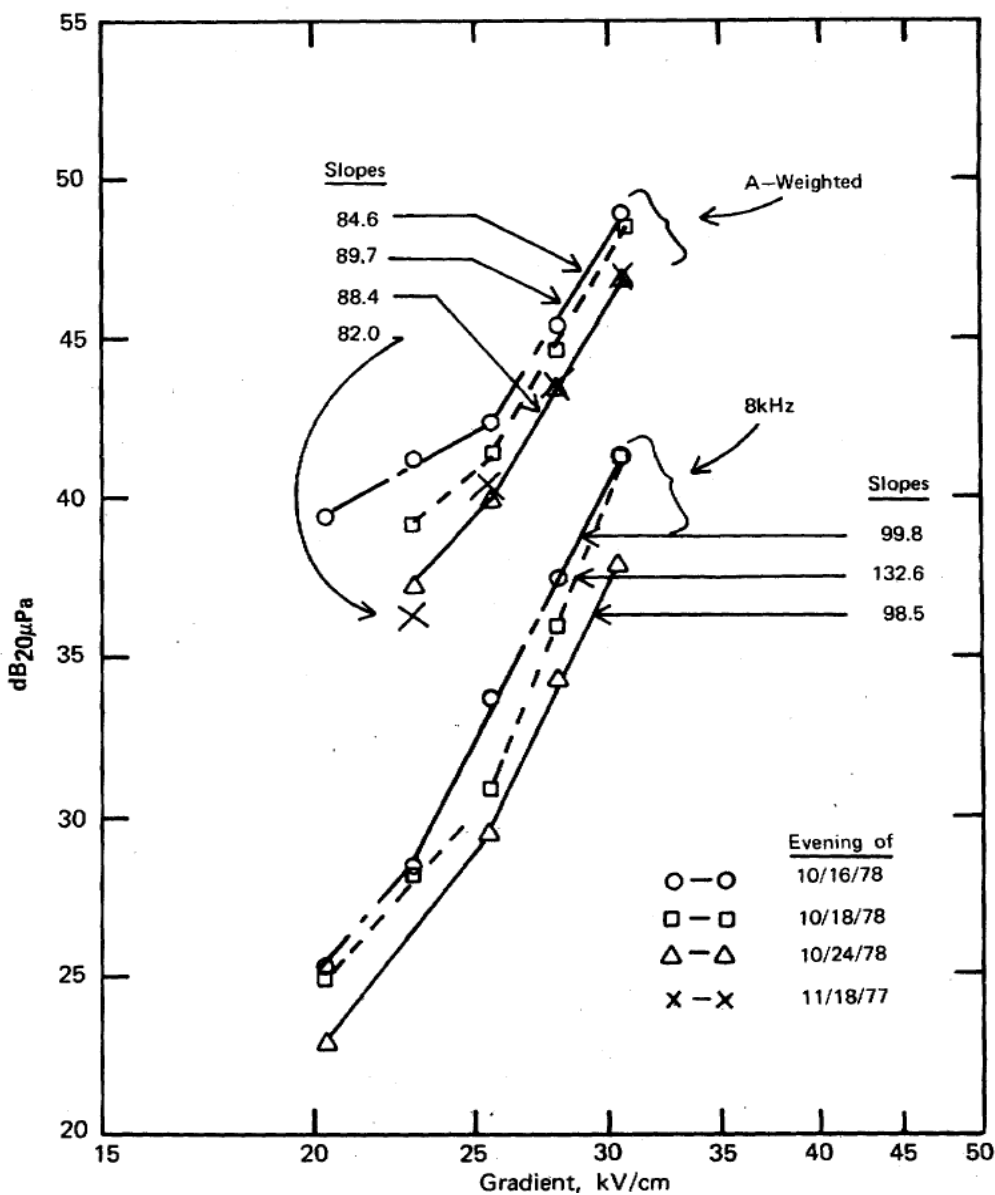


Figura 2.6: Variación de RA A-Ponderado y de 8kHz con líneas dc con gradiente de superficie máximo.

Las pendientes de estos RA A-ponderados varían entre  $82-88 \log E/E_0$ , por lo que una pendiente promedio de  $86 \log E/E_0$  se considerará un buen término para predecir el efecto de la gradiente de superficie de conductor en RA.

También se ve en la imagen la octava banda de 8 kHz vs voltaje. La pendiente de estas curvas es más empinada que las curvas A-ponderadas, las que indican que no existe una perfecta correlación entre 8 kHz y RA A-ponderado en RA dc.

### 2.3.6. Diámetro del conductor

No existe una suficiente variedad de datos de conductores dc para desarrollar un término para el efecto de la gradiente de superficie de un conductor, sin embargo, el término más usado tanto para RA como para Radio Interferencia es  $40 \log d/d_0$ .

### 2.3.7. Número de conductores

Ya que un término definitivo sencillo no se pudo desarrollar por el efecto del número de conductores en RA para líneas ac, se puede esperar algo similar para líneas dc. Los datos de RA en buen clima mostrados en la tabla 2.2 fueron usados para desarrollar este diámetro equivalente. El RA A-ponderado medio es tanto para otoño como para primavera. Los niveles medios durante el verano parecen ser 2-4 dB más altos que para otoño y primavera.

También se muestra el PWL (Niveles de Potencia Acústica, por sus siglas en inglés) para cada una de estas líneas. Estos PWLs son para el polo positivo de las líneas dc, ya que el polo negativo produce muy poco ruido audible.

Los diámetros equivalentes se calcularon usando datos de PWL cercanos a 50 obtenidos durante el otoño en el conductor 2-46.2 mm como referencia. La ecuación usada fue

$$PWL = 62.4 + 86 \log \left( \frac{E}{27.2} \right) + 40 \log \left( \frac{d_{eq}}{46.2} \right) \quad 2.33.$$

Los resultados de este cálculo para cada línea se muestran a continuación.

Tabla 2.2: Diámetros equivalentes calculados para distintas líneas DC.

Line	Conductor (m)	deq (mm)	deq/d
Square Butte	1 - 50.4	50.87	1.009
The Dalles	4 - 30.5	54.96	1.802
IREQ	4 - 40.7	61.22	1.504
IREQ	6 - 40.7	86.79	2.132
IREQ	8 - 45.7	109.71	2.401

### 2.3.8. Ecuación general DC

Usando los resultados de las discusiones previas, puede ser desarrollada una fórmula general dc para predecir los niveles de RA A-ponderados durante buen clima en los meses de otoño.

$$\begin{aligned}
 PWL &= 62.4 + 86 \log\left(\frac{E}{27.2}\right) + 40 \log\left(\frac{d_{eq}}{46.2}\right) \\
 &= -127.6 + 86 \log E + 40 \log d_{eq}
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

En términos de nivel de sonido A-ponderado

$$\begin{aligned}
 SLA &= PWL - 11.4 \log R - 5.8 \\
 &= -133.4 + 86 \log E + 40 \log d_{eq} - 11.4 \log R
 \end{aligned}
 \tag{2.35}$$

## 2.4. Evaluación de pérdidas corona [5]

### 2.4.1. Parámetros que influyen en el fenómeno corona

En líneas dc, la presencia de cargas libres en un espacio que puede extenderse por varios cientos de metros desde los conductores, influye la magnitud del efecto corona, opuesto a lo visto en líneas ac, donde el espacio involucrado es limitado a la vecindad del conductor.

La presencia de cargas libres altera el campo eléctrico alrededor de la línea y como resultado el gradiente de la superficie del conductor supone valores diferentes de aquellos calculados con métodos tradicionales, más aún, causan corrientes de conducción entre conductores de diferentes polos y entre conductores y tierra.

Las pérdidas en una línea dc, por consiguiente, deben ser expresadas en función de los siguientes parámetros de línea:

- Valor máximo de gradiente de superficie de los subconductores;
- Diámetro de los subconductores;
- Número de los subconductores;
- Distancia entre polos;
- Altura promedio de los polos a tierra;

Se debe recordar, además, que las condiciones atmosféricas (buen clima, lluvia, nieve, etc.) influyen menos en las pérdidas en dc que en ac, pruebas han demostrado que hay una variación estacional en las pérdidas, lo cual está conectado a los diferentes contenidos de vapor de agua y cantidad de polvo en el aire.

#### **2.4.2. Resultados experimentales [5]**

Los resultados experimentales disponibles en la literatura están relacionados a grandes niveles de voltaje (de +/-150 kV a +/- 1200 kV) [5]. En la tabla siguiente se resumen los niveles de voltaje, valores máximos de gradiente y las características geométricas de las líneas que fueron referidas por el estudio.



Tabla 2.3: Nivel de voltaje, nivel de gradiente máximo y geometría de línea aérea bipolar.

Ref.	V [kV]	n	d [mm]	D [m]	H [m]	g [kV/cm]
	600	4	30.5	6	15.2	20 - 30
8	400	1 - 2	40.2 - 61.0	10.5 - 19.8	18.0 - 21.6	20 - 23
9	400 - 550	1	40.2 - 61.0	10.5 - 19.8	14.0	20 - 30
10	600	2 - 4	22.4 - 25.3	10.5 - 19.8	14.0	20 - 30
11	450	2	40.6	13.2	16.0	10 - 24
12	600 - 1200	6 - 8	40.6 - 45.7	15.5	15.2 - 16.6	22 - 30
13	900	6	40.6	13.7 - 16.8	15.5 - 19.1	22 - 30
14	150 - 350	1 - 2	29.3 - 36.2	6.0 - 12.0	13.0 - 15.0	17 - 23
15	600	1 - 4	17.6 - 39.2	6.0 - 24.0	13.0	18 - 26
17	400	2	39.3	7.0	13.0	13 - 30
18	200 - 450	1	20.4 - 28.0	10.4	9.2	12 - 35
22	750	4	40.6	13.7	16.6	23 - 34
24	200 - 450	1	20.4	10.4	9.2	20 - 33

### 2.4.3. Síntesis de los datos experimentales

La evaluación directa de las pérdidas corona en una línea durante la fase de diseño es de particular complejidad debido a su dependencia con todos los parámetros principales de línea. Para simplificar los cálculos, se puede determinar, en vez del valor absoluto de las pérdidas, su valor relativo calculado con respecto a los valores conocidos de una línea que se supone como referencia.

De esta forma, las pérdidas corona se pueden expresar a través de la siguiente función monomial.

$$P = P_0 \left(\frac{g}{g_0}\right)^{a_1} \left(\frac{d}{d_0}\right)^{a_2} \left(\frac{n}{n_0}\right)^{a_3} \left(\frac{H}{H_0}\right)^{a_4} \left(\frac{D}{D_0}\right)^{a_5} \quad 2.36.$$

Donde

P: Logaritmo de pérdidas de potencia en dB sobre 1 kW/circuito-km.

$P_0$ : Logaritmo de pérdidas de potencia en dB sobre 1 kW/circuito-km, supuestos como referencia.

La determinación de cada exponente  $a_i$  es como se detalla a continuación [5].

- Datos experimentales de pérdidas corona versus variaciones de gradiente de superficie se interpolan para determinar  $a_1$ ; los otros parámetros se mantienen constantes.
- Los datos experimentales son modificados de acuerdo a  $a_1$ ; como resultado, todos los datos ya no dependen de la gradiente de superficie, pero solo en los otros parámetros.
- Paso a) y b) son sacados de cada uno de los otros parámetros (diámetro y número de los subconductores, altura sobre la tierra, etc.) para obtener los otros 3 coeficientes; en cada paso, los datos experimentales son modificados de acuerdo al exponente  $a_1$  ya determinado.

#### 2.4.4. Expresiones analíticas de pérdidas corona

En la base del método ilustrado en la sección previa, las siguientes fórmulas semi-empíricas se obtienen:

Para buen clima

$$P = P_0 \left(\frac{g}{g_0}\right)^5 \left(\frac{d}{d_0}\right)^3 \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-1} \left(\frac{D}{D_0}\right)^{-1} \quad 2.37.$$

Para mal clima

$$P = P_0 \left(\frac{g}{g_0}\right)^4 \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 \left(\frac{n}{n_0}\right)^{1.5} \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-1} \left(\frac{D}{D_0}\right)^{-1} \quad 2.38.$$

Los valores de referencia supuestos para los otros parámetros son los siguientes:

$$g_0 = 25 \frac{kV}{cm}, d_0 = 30.5 \text{ mm}, n_0 = 3, D_0 = 15 \text{ m}, H_0 = 15 \text{ m}.$$

Los valores de referencia supuestos para la potencia  $P_0$  dependen de los parámetros de la línea y elementos inciertos, que son difíciles de evaluar. Luego, es posible elegir valores que minimicen la media aritmética de las diferencias entre las pérdidas calculadas y las medidas.

Por lo tanto, los valores elegidos para  $P_0$  han sido  $P_0=2.9$  dB para buen clima, y  $P_0=11$  dB para mal clima. [1]

### 2.4.5. Comparación con resultados experimentales

Los valores de pérdidas corona obtenidas mediante las ecuaciones anteriores han sido comparadas con resultados experimentales. El resumen de estas comparaciones, llevadas a cabo para buen y mal clima separadamente, se reportan en la figura 2.7. Como se puede verificar a través de estas figuras, el error es, en la mayoría de los casos, limitado a  $\pm 2$  dB, tanto en el caso de buen como de mal clima.

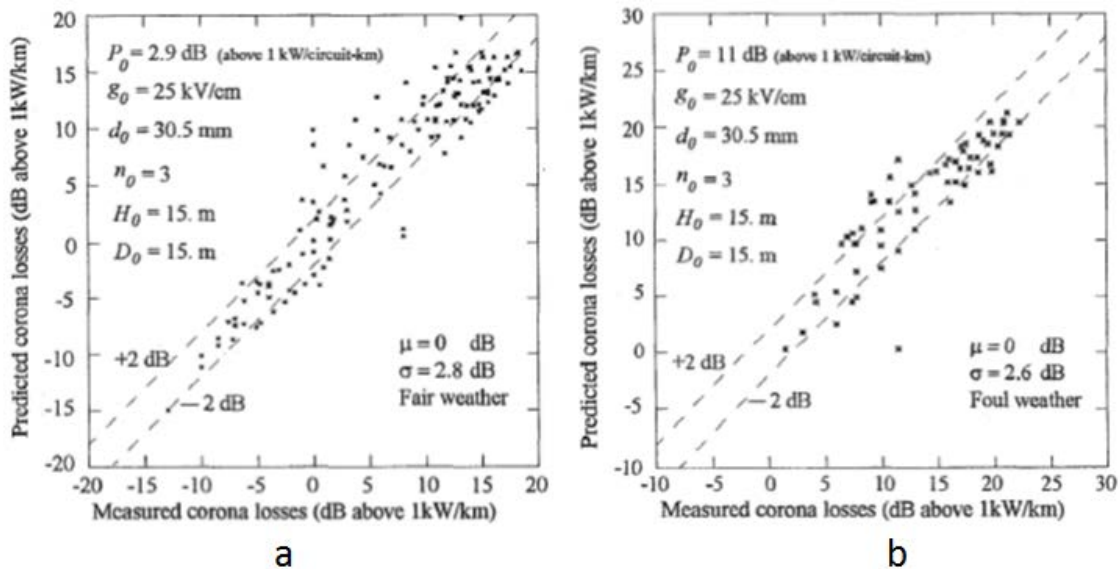


Figura 2.7: Comparación entre niveles de pérdidas corona medidos y estimados para a: buen tiempo; b: mal tiempo [5].

### 2.4.6. Comparación de otras expresiones semi empíricas con resultados experimentales

En base a los mismos resultados experimentales usados anteriormente, se hizo una comparación con otras expresiones semi-empíricas disponibles en la literatura [1][5], para el cálculo aproximado de pérdidas corona en líneas dc bipolares.

Las formulas usadas son las siguientes

$$P = P_0 \left( \frac{g}{g_0} \right)^{5.6} \left( \frac{r'}{r'_0} \right)^2 \quad 2.39.$$

$$P = P_0 \left( \frac{g}{g_0} \right)^4 \left( \frac{D}{D_0} \right)^2 \left( \frac{r'}{r'_0} \right) \frac{n}{n_0} \quad 2.40.$$

$$P = 2V \left( 1 + \frac{2}{\pi} \arctg \left( \frac{2H}{D} \right) \right) 0.2nr 2^{0.25(g-g_0)} 10^{-3} \frac{kW}{\text{circuit} - km} \quad 2.41.$$

La fórmula

$$P = P_0 + C_g(g - g_0) + 20 \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + C_n \log \left( \frac{n}{n_0} \right) \quad 2.42.$$

Que considera las variaciones estacionales, no fue tomada en cuenta, debido a la poca duración de los resultados experimentales. En esta ecuación, los factores  $P_0$ ,  $C_g$  y  $C_n$  suponen los valores indicados en la siguiente tabla.

**Tabla 2.4: Parámetros para la ecuación (43) dados por Maruvada [5].**

Season	Atmospheric conditions	$P_0$ [dB]	$C_g$	$C_n$
summer	fair weather	13.7	0.80	28.1
summer	foul weather	19.3	0.63	9.7
spring, autumn	fair weather	12.3	0.88	36.9
spring, autumn	foul weather	17.9	0.72	12.8
winter	fair weather	9.6	1.00	44.3
winter	foul weather	14.9	0.85	10.2

Los valores de  $g_0$ ,  $n_0$  y  $r_0$  son los adoptados originalmente, mientras que para  $P_0$ , que se determinaron de acuerdo a los criterios antes mencionados, se supusieron los siguientes valores:

- Para la primera fórmula,  $P_0=4.8$  dB para buen clima y 11 dB para mal clima.
- Para la segunda,  $P_0= 6.1$  dB para buen clima y 12.2 dB para mal clima.

La características más evidentes de tal fórmula, que es que son independientes de las variaciones estacionales, es en base a la definición de radio equivalente  $r'$  que es función del

número, diámetro, distancia entre subconductores, distancia entre polos, y altura promedio sobre tierra. El cálculo de tal parámetro solo se ha reportado para el caso de 2 y 4 subconductores.

La comparación con resultados experimentales, reportados a continuación [5], muestra que los valores predichos son subestimados ( $m=-4.4$  dB). Para conveniencia de la representación, en la figura mencionada los valores de pérdida de potencia se reportan en dB sobre 1 kW/circuito-km.

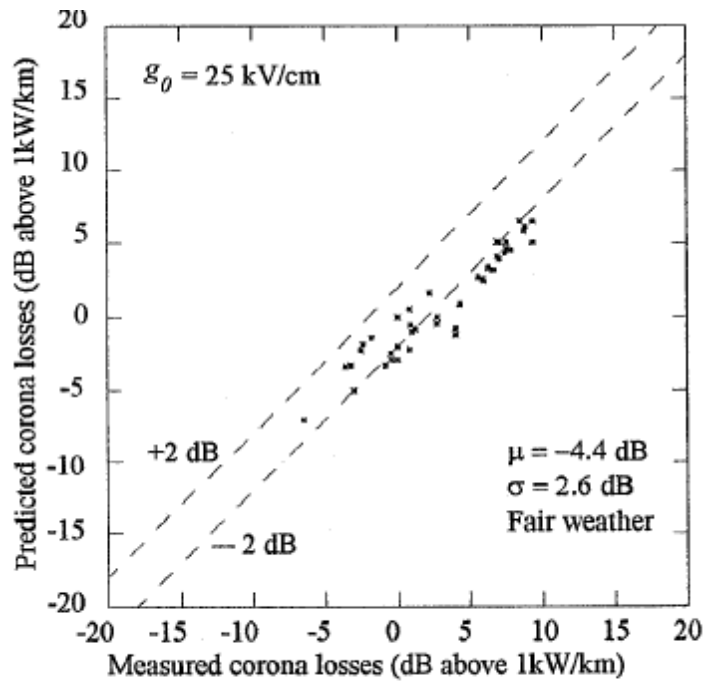


Figura 2.8: Comparación entre datos estimados y medidos [5].

La fórmula es válida solo para buen clima

## 2.5. Radiointerferencia [7]

Las fuentes de esta radiación electromagnética de banda ancha son descargas que pueden ocurrir en el aislador del conductor, como descargas corona que ocurren a lo largo de la línea. Este estudio se centrará principalmente en el segundo tipo.

Estas emisiones deben su nombre a que en su mayoría son menores a los 3 MHz, afectando principalmente las ondas de Amplitud Modulada (AM)

Se sabe que el efecto corona es mucho más marcado en los conductores de polaridad positiva que en los conductores de polaridad negativa, toda vez que las descargas en estos últimos tienden a ser relativamente uniformemente distribuidos, lo que los hace contribuir en menor grado a la RI.

Esto último desemboca en que el perfil lateral de la RI es simétrica con respecto a los polos positivos, mientras que se atenúa inversamente al cuadrado de la distancia radial a aproximadamente 50m (a 1MHz), para luego atenuar inversamente a la distancia.

Los principales factores que afectan la RI son la humedad del aire (que disminuye el efecto de la RI), aunque tiende a aumentar en la fase inicial de la humectación del conductor, la temperatura, que provoca una variación solidaria junto con la RI, es decir, se incrementa el efecto de la RI con el aumento de la temperatura, al igual que el viento. Luego, es correcto afirmar que los eventos climáticos que generen estas condiciones atmosféricas producen dichos efectos en el nivel de RI en las cercanías del conductor. Por ejemplo, la lluvia disminuye la RI en las cercanías de la línea. Lo contrario ocurre con un aumento de la temperatura, lo que incrementa la RI.

Ahora bien, refiriéndose netamente al viento, y tal como se mencionó previamente, este afecta positivamente a la RI, aumentándola. Este efecto se ve dramáticamente aumentado cuando la dirección del viento va desde el polo negativo al positivo, ya que el viento “arrastra” iones desde la zona de menor RI hacia la zona donde el efecto ya es marcado, producto de la polaridad del otro conductor.

Dicho todo esto, a continuación se muestra una relación empírica que permite estimar con una precisión aceptable la RI en  $dB \frac{\mu V}{m}$

$$RI = 214 \log\left(\frac{g_{max}}{g_0}\right) - 278 \left[\log\left[\frac{g_{max}}{g_0}\right]\right]^2 + 40 \log(r) \quad 2.43.$$

Donde se tiene que  $g_{max}$ : Máximo gradiente de superficie de conductor, en kV/cm

$g_0$ : Gradiente crítico en kV/cm (supuesto 14kV/cm)

$r$ : Radio de un conductor, en cm

En la siguiente tabla se muestra una comparación del valor de la RI calculado y medido

**Tabla 2.5: Comparación entre el nivel de RI calculado y medido [7].**

Diámetro del conductor [mm]	Número de Conductores por Polo	Separación de los polos m	Potencial de operación [kV]	Máximo gradiente de conductor [kV/cm]	RI en buen clima medido	RI en buen clima calculado $\left[ dB \frac{\mu V}{m} \right]$
61	1	10.5	± 400	22.5	53.4	51.7
46	2	10.5	±400	21.2	43.2	44
46	2	18.3	±500	24	49	49.3
46	2	18.3	±525	25.2	49	51
46	2	18.3	±600	28.8	55.9	54.3
30.5	4	11.2	±500	25	42.9	43.6
30.5	4	11.2	±600	29.9	48.9	47.6
30.5	4	13.2	±525	25	42.8	43.6
30.5	4	13.2	±600	28.4	47.3	46.9

## 2.6. Campo magnético [1] [2]

El campo magnético no tiene mayores efectos en este tipo de instalaciones, toda vez que, al tratarse de líneas de transmisión de corriente continua, este fenómeno casi no se presenta, al ser un campo estático. Esto significa que no se inducirá corriente en algún objeto cercano, disminuyendo drásticamente el riesgo de electrocución por inducción de corriente en objetos que no debieran estar energizados.

Para verificar esto, se calculará el campo magnético  $B$  mediante la Ley de Ampère, de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad 2.44.$$

Donde  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del aire,  $I$  es la corriente que circula por cada circuito de la línea, y  $r$  representa la distancia radial desde el conductor más cercano al punto donde se desea calcular el campo magnético.

### 2.6.1. Efecto del terreno; conductor imagen

Por analogía con el método de simulación de cargas aplicado a líneas de transmisión para el cálculo del campo eléctrico, es posible plantear un método de simulación de corrientes para calcular el campo magnético bajo los conductores de líneas y barras. En este caso no se hace necesario resolver un sistema de ecuaciones, pues la fuente del campo es directamente la corriente por el conductor.

A su vez, el terreno ya no es un “conductor magnético” y las líneas de campo atraviesan la superficie del suelo. El plano equivalente de referencia se encuentra a bastante profundidad: se incorpora un nuevo parámetro “p” que representa la profundidad pelicular del campo, o distancia desde la superficie del suelo hasta este plano de referencia para el campo magnético.

En este caso, las expresiones de las componentes del campo magnético para cada conductor “i” son:

$$Bx_i = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \left[ -\frac{y - y_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{y + y_i + 2p}{(x - x_i)^2 + (y + y_i + 2p)^2} \right] \quad 2.45.$$

$$By_i = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \cdot \left[ -\frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i + 2p)^2} \right] \quad 2.46.$$

El primer término de estas expresiones representa la contribución del conductor real y el segundo término, del conductor imagen. El parámetro “p” tiene la expresión:

$$p = \frac{1}{\sqrt{\mu\sigma\omega}} = 355.88 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad 2.47.$$

Para 50 Hz, resulta:

$$p = 50.3\sqrt{\rho} \quad 2.48.$$



Con una resistividad del terreno de solo 100 Ohm – m, la profundidad pelicular es del orden de 500 metros para 50 Hz, con campo estático (f=0 Hz) la profundidad de penetración tiende a infinito, por lo que el efecto de los conductores imágenes se hace despreciable cuando se evalúa el campo magnético en las proximidades de los conductores.

## **2.7. Marco normativo para las magnitudes de Campo Eléctrico y Magnético**

Con el fin de asegurar una operación segura, tanto para las personas que realizan operaciones de rutina y mantenimiento en las líneas, como para las personas que transitan en las inmediaciones de la línea, y por qué no decirlo, para la fauna de la zona, es que se han establecido márgenes seguros de magnitudes de los campos eléctricos y magnéticos generados por la operación de la línea de transmisión a nivel internacional. A continuación, se detallan las normativas existentes a nivel internacional.

### **2.7.1. Normas de Campo Magnético [11]**

Con respecto al Campo Magnético estático, la Organización Mundial de la Salud establece lo siguiente:

“La Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes se ha ocupado de la exposición a campos magnéticos estáticos (véase: [www.icnirp.org](http://www.icnirp.org)). Los límites actuales de exposición en la actividad laboral se han establecido para evitar las sensaciones de vértigo y náusea inducidas por el movimiento en un campo magnético estático. Los límites recomendados son promedios ponderados por el tiempo de 200 mT para la exposición durante la jornada laboral, con un valor máximo de 2 T. Para el público en general se ha fijado un límite de exposición continua de 40 mT.

Los campos magnéticos estáticos afectan a dispositivos metálicos implantados, como los marcapasos implantados en el cuerpo, lo cual puede tener efectos sanitarios adversos directos. Se sugiere que los portadores de marcapasos cardíacos, implantes ferromagnéticos y dispositivos electrónicos implantados deben evitar los lugares con campos magnéticos de más de 0,5 mT. También deben evitarse los riesgos provocados por objetos metálicos atraídos repentinamente por magnetos con campos superiores a 3 mT”.

Dado que no existe suficiente información científica que establezca los efectos de la exposición a largo plazo, o retardos de la exposición, es recomendable adoptar medidas cautelares para limitar la exposición tanto de trabajadores como del público en general. Para ello, la OMS recomienda la adopción de las siguientes medidas.

- Adoptar normas internacionales basadas en datos científicos para limitar la exposición humana.

- Aplicar medidas de protección para la utilización de campos magnéticos en la industria y la investigación científica estableciendo distancias mínimas en el caso de campos magnéticos que pueden suponer un riesgo importante, confinando los campos o aplicando controles administrativos, por ejemplo, en el marco de programas de educación del personal.

- Estudiar la posibilidad de establecer un procedimiento de autorización para el equipo de imagen de resonancia magnética (IRM) con campos de más de 2 T, a fin de garantizar la aplicación de medidas de protección.

- Financiar investigaciones para colmar las importantes lagunas de conocimientos acerca de la seguridad de las personas.

- Financiar equipos y bases de datos de IRM para recoger información sanitaria sobre la exposición de los técnicos y los pacientes.

### **2.7.2. Normas de Campo Eléctrico estático [11] [12]**

No existen demasiados datos o estudios acerca de los efectos de los campos eléctricos estáticos. Estos campos inducen una carga de superficie en el cuerpo mientras que dentro del cuerpo el campo es muy pequeño o cero. Según los resultados obtenidos hasta el momento, los únicos efectos agudos con intensidades suficientemente altas de campo están asociados con movimiento del vello cutáneo especialmente en la cabeza o miembros y malestar provocado por descarga de chispas, si la carga alcanza un nivel suficientemente alto. Una persona eléctricamente puesta a tierra que toca un objeto metálico aislado recibirá una corriente del objeto y experimentará una descarga eléctrica o chispa. Asimismo, una persona caminando a través de una alfombra en una atmósfera seca se carga y se descarga al tocar un objeto metálico aterrizado.

De esta forma, el estándar C95.6 – 2002 de la IEEE plantea una base científica para definir finalmente los límites propuestos. Define Restricciones Básicas que se aplican a diversas regiones de cuerpo, tanto para público general como en ambiente controlado, que dependen de la frecuencia del campo; las Restricciones Básicas se refieren a limitaciones en las fuerzas eléctricas in situ (en el interior del cuerpo) que evitan efectos adversos. Tales restricciones son derivadas hacia valores umbrales eléctricos adversos, que se indican en la Tabla siguiente.

**Tabla 2.6: Restricciones básicas aplicadas a varias regiones del cuerpo.**

Tejido Expuesto	$f_e$	Público en general	Ambiente controlado
	(Hz)	$E_0 \cdot rms \left( \frac{V}{m} \right)$	$E_0 \cdot rms \left( \frac{V}{m} \right)$
<b>Cerebro</b>	20	$5.89 \cdot 10^{-3}$	$1.77 \cdot 10^{-2}$
<b>Corazón</b>	167	0.943	0.943
<b>Manos, muñecas, pies y tobillos</b>	3350	2.10	2.10
<b>Otros tejidos</b>	3350	0.701	2.10

Con respecto a los campos eléctricos estáticos y cuasi-estáticos, a continuación se listan los límites máximos de campo eléctrico ambiental no perturbado (en ausencia del objeto o persona). Se supone que el campo no perturbado es constante en magnitud, dirección y fase relativa, sobre una extensión espacial mayor que el cuerpo humano. El tiempo promedio para una medida rms será 0,2 segundos para frecuencias sobre 25 Hz. Para frecuencias más bajas, el tiempo promedio debe ser tal que por lo menos 5 ciclos sean incluidos, con un máximo de 10 segundos. Para un ambiente controlado en el que un individuo expuesto no está al alcance de un objeto aterrizado, puede ser aceptable exceder los límites listados en la siguiente tabla. Este estándar no especifica límites para situaciones que implican contacto con objetos no aterrizados.

El máximo campo eléctrico ambiental permisible ha sido definido para limitar la probabilidad de descargas dolorosas producto de una chispa. En principio, este límite puede extenderse a frecuencias arbitrariamente bajas ya que aún una única descarga puede ser dolorosa. Sin embargo, a una frecuencia suficientemente baja, la constante de tiempo a la cual un humano puede mantener una carga superficial comenzará a limitar la magnitud de la carga inducida.

**Tabla 2.7: Campo Eléctrico medioambiental, exposición de cuerpo entero.**

Público general		Ambiente controlado	
Rango de frecuencia (Hz)	$E \cdot rms \left( \frac{V}{m} \right)$	Rango de frecuencia (Hz)	$E \cdot rms \left( \frac{V}{m} \right)$
1 – 368	5000	1 – 272	20000
368- 3000	$1.84 \cdot 10^6$	272 - 3000	$5.44 \cdot 10^{-6}$
3000	614	3000	1813

Los límites del campo de la Tabla 2.6 que proporcionan protección contra corriente de contacto adversa, varían en proporción inversa a la frecuencia. Si esta ley se extendiera a frecuencia cero, el límite de campo eléctrico tendería a infinito. Para el máximo campo E permisible se coloca un valor superior para limitar la probabilidad de una descarga de chispa. El campo máximo permisible en la Tabla 2.7 son **5 kV/m** para el público en general. Se estima que las descargas de chispa serían dolorosas para aproximadamente un 7% de adultos que están aislados y que tocan un objeto conectado a tierra dentro de un campo de 5 kV/m. También pueden ocurrir descargas de chispa desagradables cuando una persona conectada a tierra, toca un objeto conductor grande bien aislado del suelo, situado dentro de un campo elevado. No es posible proteger absolutamente contra toda posibilidad de efecto molesto, sin mitigar la carga inducida en el objeto, cuando objetos muy grandes (o largos) se sitúan cerca de fuentes que producen campos eléctricos muy extendidos espacialmente, como es el caso de líneas de transmisión de alto voltaje.

Por ejemplo se podría postular una larga reja de alambre en postes aislados que corren paralelo a una línea de transmisión del alto voltaje. En tales casos, es preferible restringir la estimulación eléctrica por una puesta a tierra apropiada del objeto conductor, antes que limitar el campo eléctrico a un nivel pequeño impracticable. En el ambiente controlado, donde la máxima exposición permisible se limita a **20 kV/m**, con el límite establecido para una persona aislada a nivel del suelo que toca un objeto conductor aterrizado, fácilmente pueden presentarse descargas con chispa dolorosa, pero sin corrientes de contacto. En campos tan intensos, los trabajadores deben limitar la probabilidad de descargas dolorosas de chispa usando ropa protectora apropiada, u otras prácticas de trabajo que consideran estos efectos ambientales de campo eléctrico.

En ambiente controlado, pueden usarse trajes conductivos que protegen el cuerpo de campos eléctricos ambientales altos, con lo cual reducen mucho la estimulación eléctrica indirecta. Las corrientes conducidas por el cuerpo de individuos que llevan ropa protectora no excederá lo indicado en la tabla 2.7. Cuando un individuo expuesto no está al alcance de un objeto conductor aterrizado, como un trabajador de línea viva en un cubo aislado, no aplican los límites máximos de exposición de la Tabla 2.6. En tales casos, la magnitud de corriente de contacto y descargas de chispa serán determinadas por la diferencia de potencial entre el individuo y el objeto tocado. A pesar del tamaño y la proximidad de objetos conductores que pueden ser tocados por el individuo expuesto, el límite superior absoluto de exposición aceptable se determinará por la necesidad de prevenir corona en la superficie del cuerpo. Es improbable que

exposiciones por encima de 30 kV/m (campo no perturbado) sean aceptables en cualquier parte expuesta del cuerpo.

### **3. Desarrollo de la memoria**

Como es de esperarse, al momento de la planificación que llevaría a la realización del modelo que aquí se presenta, se evaluaron muchas alternativas para cada variable a estudiar.

La primera elección que se realizó fue el lenguaje en el cual este modelo se desarrollaría. Dado que se busca, a futuro, desarrollar esta aplicación a nivel industrial, se eligió MatLab, dado que es un lenguaje en el que es fácil programar, debido a que no es necesario crear librerías para manejar las variables, además de que su sintaxis es universal prácticamente a cualquier otro lenguaje de programación, como Java o C++.

Una vez elegido el lenguaje, se eligieron los métodos con los que se confeccionaría el modelo. No obstante, se debió cambiar esta elección inicial, debido a que se presentaron dificultades que tomarían demasiado tiempo en ser resueltas.

Finalmente, se decidió la estructura que se le dio al código. Se decidió separar los procesos en bloques, dado que, si bien se pierde velocidad de ejecución al tener que agregar procesos de lectura de disco en otro archivo, se ganó en orden a la hora de programar y ejecutar el código. Esta estructura “distribuida” permite, además, ubicar y corregir errores de manera mucho más rápida y eficiente una vez que estos se presentaban.

A continuación se muestra un diagrama de bloques en el que se ilustra el funcionamiento de la aplicación.

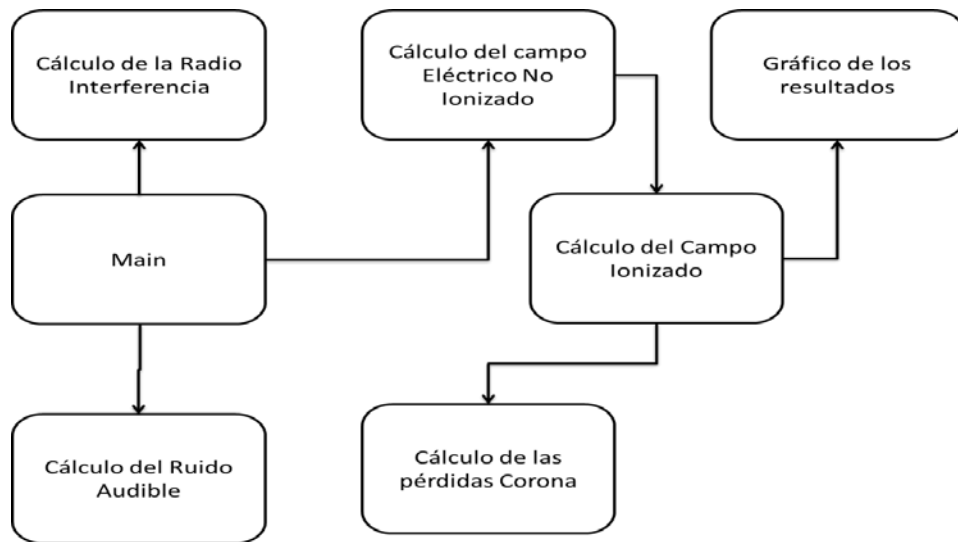


Figura 3.1: Esquema del programa implementado.

Se puede apreciar que las variables “esenciales” se calculan dentro de su propio proceso, mientras que las tareas más “genéricas” se realizan en la función “*main*”. Esta función, además de realizar las labores de proceso “unificador”, también recibe los datos ingresados por el usuario, referentes a la línea de transmisión propiamente tal, como lo son las dimensiones de esta, es decir, el diámetro de los conductores, la separación de los subconductores dentro de un mismo polo, la tensión aplicada a cada polo, etc.

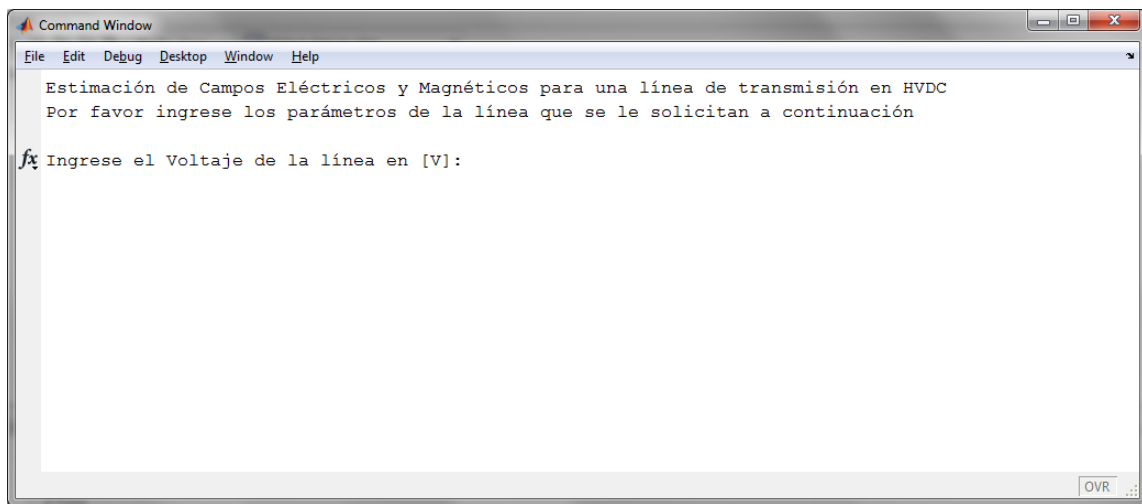


Figura 3.2: Captura de Pantalla del programa, solicitando los parámetros de operación uno por uno.

Una vez recopilados estos datos, el programa realizará los cálculos necesarios para cada tipo de conexión, para luego realizar gráficos y planillas de cálculo con el valor de las variables electromagnéticas que se buscan, como lo son el Campo Eléctrico, el Campo Magnético y la Densidad de Carga Espacial.

```
Command Window
File Edit Debug Desktop Window Help
Estimación de Campos Eléctricos y Magnéticos para una línea de transmisión en HVDC
Por favor ingrese los parámetros de la línea que se le solicitan a continuación

Ingrese el Voltaje de la línea en [V]: 500000
Ingrese la corriente nominal por circuito [A]: 2700
Ingrese el radio de los conductores [m]: 0.0171
Ingrese la máxima separación de los conductores en el arreglo [m]: 0.5
Ingrese la separación entre los arreglos 1 y 2 [m]: 11.5
Ingrese la separación entre los arreglos de conductores 3 y 4 [m]: 15
Ingrese la diferencia de altura entre los arreglos 1 y 2 con 3 y 4 [m]: 12.5
Ingrese la altura del primer arreglo de conductores [m]: 29.5

Por favor, espere. El proceso puede tomar varios minutos
fx
```

Figura 3.3: Captura de pantalla del programa una vez recopilados los datos ingresados por el usuario.

Una vez almacenados los resultados, y sus correspondientes diagramaciones, en archivos separados, se desplegará en pantalla el resultado del valor de las pérdidas corona en la línea.

```
Command Window
File Edit Debug Desktop Window Help
Procesado con éxito

Las pérdidas corona de la línea son

ans =
    1.2423e-007

El ruido audible para el tipo de conexión 1 es de ([Pa dB])
Ruido1 =
    -160.9935 -182.4237

EL ruido audible para el tipo de conexión 2 es de ([Pa dB])
Ruido2 =
    -165.6867 -187.1169

EL ruido audible para el tipo de conexión 3 es de ([Pa dB])
Ruido3 =
    -272.7247 -294.1549

EL ruido audible para el tipo de conexión 4 es de ([Pa dB])
Ruido4 =
    -272.7247 -294.1549

fx
Por favor, espere mientras se grafican los resultados. Esto puede tomar unos minutos
```

Figura 3.4: Captura de pantalla del programa una vez realizados los cálculos.

Es importante señalar que se supone que el programa será operado por alguien con conocimientos del tema, por lo que se espera no habrían problemas de ingreso de los valores de los parámetros requeridos.

Para realizar los cálculos, el programa genera una grilla de cuadrados en el espacio, en cuyos nodos se calculará el valor del campo no ionizado, a través del método de los elementos finitos, lo que permite calcular tanto el potencial libre de carga espacial como el campo eléctrico no ionizado en cualquier punto del espacio.

Una vez obtenido el campo no ionizado total, y el potencial libre de carga espacial, se procede a resolver el sistema de ecuaciones diferenciales compuesto por las ecuaciones 2.9, 2.12 y 2.15, y las condiciones de borde descritas en 2.16, lo que permite obtener, de esta manera, la densidad de carga espacial en ese punto del espacio, el valor del factor “A” y, por ende, el valor del potencial en presencia de carga espacial, y el campo ionizado en cada punto del espacio. Una vez obtenidos estos datos, los que son almacenados en una matriz de dimensiones iguales a las de la grilla, el software genera el gráfico correspondiente [3]. Para ello, el valor del campo eléctrico ionizado en cada cuadrado se tomó como el promedio simple de los valores del campo en los vértices del respectivo cuadrado. Si bien esta aproximación no es del todo precisa, se puede reducir el error generado por esta aproximación disminuyendo el intervalo en el que se calcula el valor del campo, lo que trae como efecto secundario un mayor tiempo en el cálculo y posterior diagramación de los resultados obtenidos. Cabe recalcar que la asignación de colores es por intervalos de valores, y no por el valor, por lo que son intervalos discretos, presentando un intervalo de valores del campo el mismo color en el gráfico.

Luego, una vez obtenidos los valores del campo eléctrico ionizado en varios puntos del espacio, es posible calcular el resto de las variables y parámetros buscados.

Finalmente, y de manera paralela al cálculo del campo eléctrico ionizado, estos valores calculados para cada punto de la grilla son almacenados en una planilla de cálculo, al igual que los valores del campo magnético. De esta manera, es posible realizar otro tipo de análisis estadísticos de los datos.

Con respecto al campo magnético, al inicio se solicita al usuario la corriente nominal total que circulará por los conductores de los circuitos que operan en la torre en comento. Con este dato, es posible obtener el campo magnético para cada punto en el espacio. Para esto, se obtiene el arreglo de conductores, o lo que es lo mismo, el conductor equivalente, más cercano al punto del espacio en el cual se quiere obtener el campo magnético. Finalmente, se utiliza la Ley de Ampère para calcular el valor del campo magnético.

Es importante destacar que los parámetros calculados se obtuvieron para la línea de transmisión que se muestra a continuación.



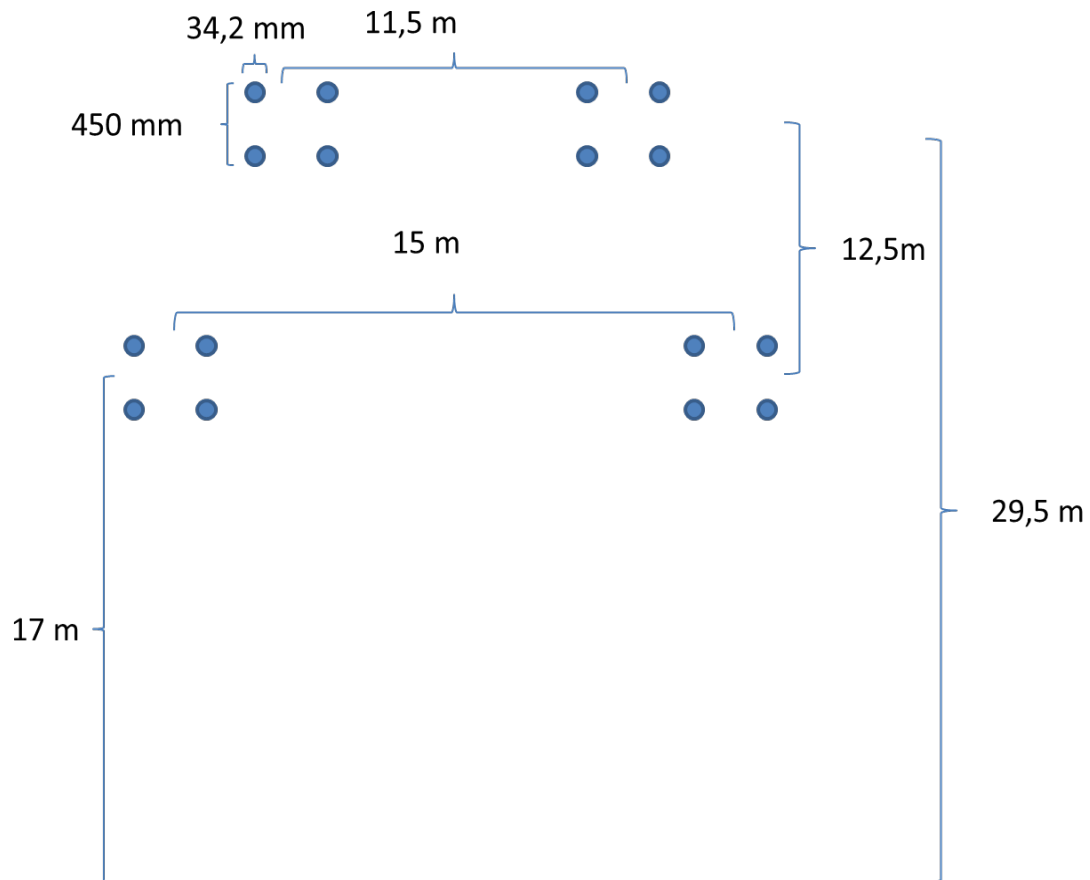


Figura 3.5: Dimensiones de la línea de transmisión para la que se realizaron los cálculos.

Por supuesto, y dado que algunas de las expresiones mostradas anteriormente cobran mayor validez solo en buen tiempo, se procedió a diseñar esta aplicación pensando en buen tiempo y poco (por no decir nulo) viento, además de suponer presión atmosférica a nivel del mar y temperatura ambiente de 25°C. Finalmente, se supone que el conductor se encuentra nuevo, o en muy buenas condiciones. Más adelante se discutirá acerca de los supuestos considerados en el modelo.

Cabe destacar que un error en una función periférica provocaba un error en la función principal, lo que resultaba muy conveniente, ya que el software entrega la línea de código que genera el conflicto, por lo que si el conflicto es generado por una de las funciones satélite, el error queda individualizado en la línea de comandos en la que se invoca esta función, permitiendo, de esta manera, ubicar y solucionar el error de manera rápida y eficiente.

Precisamente, la cantidad de errores generados o producidos por estas funciones satélite se ve minimizada al utilizar este esquema, ya que, de esta manera, es posible testear cada sección por separado, lo que permite una validación temprana de ciertas subrutinas involucradas en el proceso, resultando en la detección y resolución anticipada de posibles errores o conflictos en el código.

### 3.1. Dificultades encontradas en el proceso

Obviamente, y a pesar de que el esquema elegido minimiza los errores que se encuentran durante el proceso de modelación, el mismo no estuvo exento de dificultades.

Las principales dificultades encontradas durante el desarrollo del modelo se vieron mientras se desarrollaba el planteamiento para el cálculo del campo eléctrico.

Primeramente, se pensó en utilizar el método de los elementos finitos para realizar los cálculos, ya que este método es el más utilizado a la hora de modelar las líneas de transmisión en HVDC. Sin embargo, se llegó a un momento en el que la programación del enmallado del espacio realizado para llevar a cabo las estimaciones pertinentes al caso se hizo demasiado engorrosa y dificultosa, tomando mucho más tiempo del estipulado para esta actividad, y realizando, relativamente, muy poco avance con respecto a lo planificado.

Es por esto último que se decidió cambiar el modelo a utilizar, implementando, en cambio, el método propuesto por Yong Yang y otros. Sin embargo, si bien se ganó en velocidad de programación y de avance del proyecto, con un mínimo sacrificio de exactitud referente al método anterior, se perdió en lo referente a la velocidad de ejecución del programa, toda vez que se debe resolver una ecuación diferencial para cada punto del espacio en el que se desee calcular el campo eléctrico ionizado, aumentando el tiempo de espera del usuario para obtener un resultado, y por ende, empeorando la experiencia de usuario con el software.

Aun así, este cambio de metodología no implicó una exención en la resolución de dificultades para implementarla, ya que, como se dijo previamente, el proceso resuelve ecuaciones diferenciales para cada punto en el que se desea calcular el campo eléctrico ionizado, por lo que el planteamiento del método numérico propuesto para la resolución de esta ecuación presentó otra dificultad, debido a la naturaleza del problema. Sin embargo, un cambio en el método para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales (variables separables) permitió la resolución del sistema de una manera más rápida desde el punto de vista de ejecución del software, ya que el desarrollo se realizó completamente “a mano”, evitándole a la aplicación tener que llevarlo a cabo, debiendo, en cambio, solo desarrollar el resultado.

Por otra parte, se encontraron problemas en la indización de las matrices utilizadas para almacenar los valores tanto de la posición en el espacio de los puntos en los que se desea calcular los parámetros, como de las matrices en las que se almacenan los valores de los parámetros para determinado punto en el espacio.

Finalmente, un error en la declaración de una variable permitía la realización de solamente la simulación de uno de los tipos de conexión, problema que fue solucionado una vez se encontró la variable mal declarada. Este error pudo ser solucionado rápidamente, gracias a la estructura en bloques del software. Una vez puntualizado el problema, solo se debió identificar en qué bloque del sistema se encontraba la falla, para, finalmente, corregirla.

## **4. Discusiones y validación del modelo**

### **4.1. Grado de validez de los supuestos**

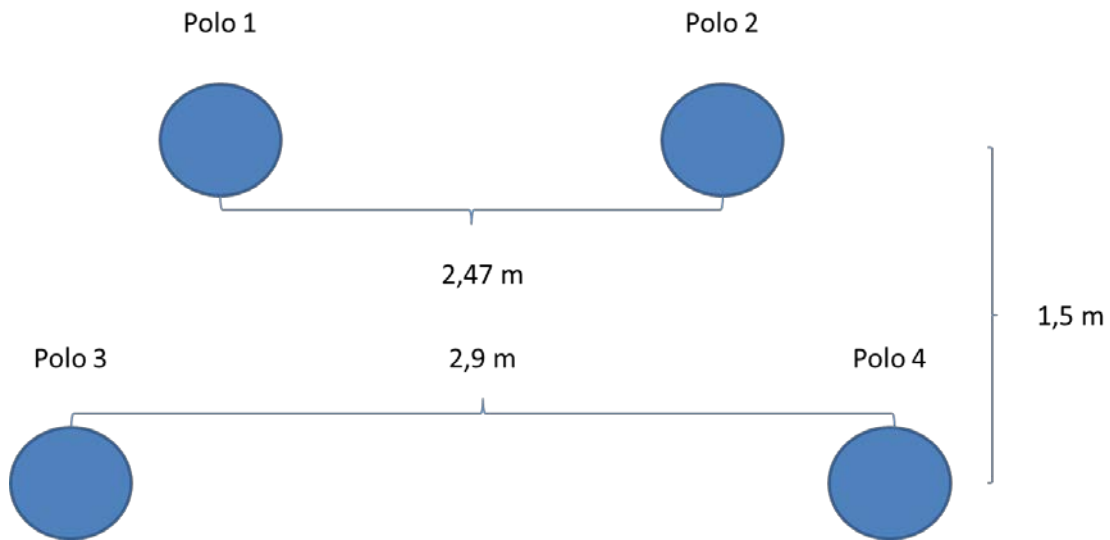
Lo primero que se discutirá será el grado de validez del modelo. Tal y como se dijo previamente, existen fórmulas que sólo son válidas para buen tiempo, por lo que este modelo, si bien es adaptable a condiciones climáticas de mal tiempo, solo es válido para buen tiempo.

Por otra parte, el supuesto 2 es válido solamente cuando tanto la dirección de la línea como la morfología del terreno se mantienen sin cambios. Esto, ya que la dirección del campo ionizado sí se ve afectada en un cambio de dirección de la línea, ya que las líneas de flujo de una y otra dirección, al menos en un sector, se superpondrán, lo que afectará la dirección en la que se mueven los iones, y por ende, el campo ionizado. Situación similar ocurre cuando el terreno sufre un cambio en su morfología. Recordar que, para que el potencial en la superficie del terreno sea nulo, la línea de flujo que va desde el polo más cercano al terreno debe llegar a este último de manera perpendicular, por lo que la línea de flujo se deberá traslapar con otra para que esto ocurra, resultando en el cambio de dirección del campo eléctrico ionizado [4] [8] [9].

El resto de los supuestos apunta, principalmente, a la simplificación del problema planteado, ajustando de esta forma el análisis desde un problema de 3 dimensiones, a un problema de 2 dimensiones solamente, simplificando los cálculos y análisis necesarios para abordar la problemática.

### **4.2. Validación del método [3]**

La validación del modelo escogido se efectuó en [3] confrontando valores calculados con valores medidos en la línea de pruebas mostrada en la siguiente imagen.



**Figura 4.1: Dimensiones de la línea de transmisión de prueba.**

La tensión de operación de esta línea es de  $\pm 120 \text{ kV}$ , mientras que los conductores son del tipo LIG-95/20. Una vez en operación, se procedieron a medir los campos eléctricos ionizados para cada tipo de conexión, en múltiples ocasiones, a un metro del suelo, en un día con buen tiempo.

Una vez obtenidos estos datos experimentales, se realizó la simulación de los campos eléctricos para los distintos tipos de conexiones mediante este método, considerando la diferencia de las pérdidas corona entre los conductores de una polaridad y otra, y luego despreciando esta diferencia

Las siguientes figuras muestran el campo eléctrico ionizado medido en esta prueba, en comparación con el campo eléctrico ionizado estimado considerando una diferencia entre el efecto corona entre los polos de diferente polaridad, y además con el campo eléctrico ionizado estimado, pero despreciando esta diferencia.

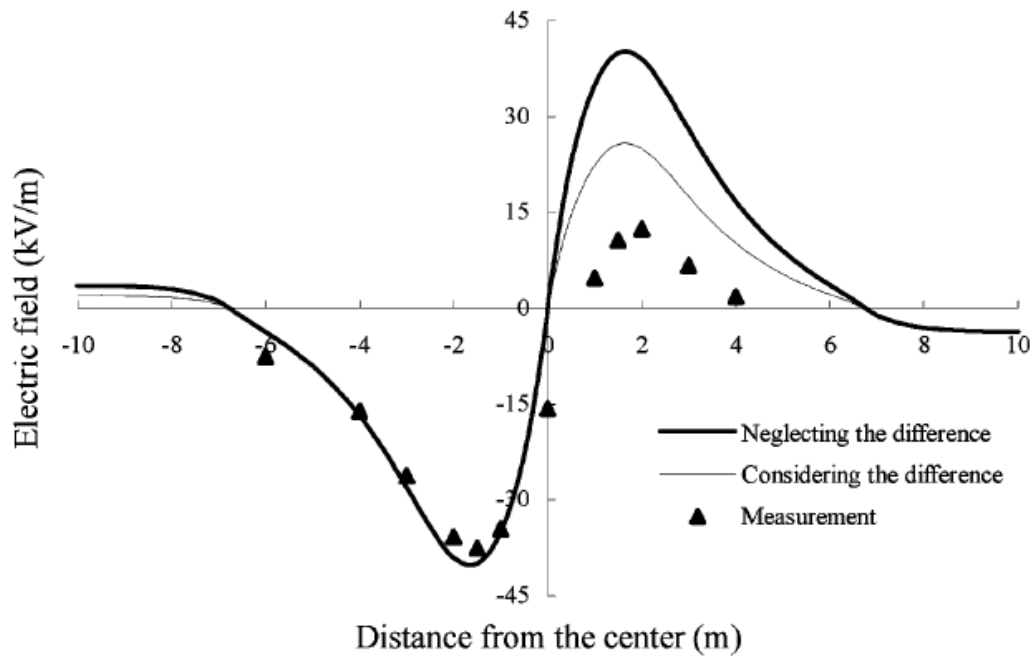


Figura 4.2: Valor medido V/s estimado para el tipo de conexión 1 [3].

A continuación se muestra el resultado de la misma prueba, esta vez implementada en la aplicación desarrollada.

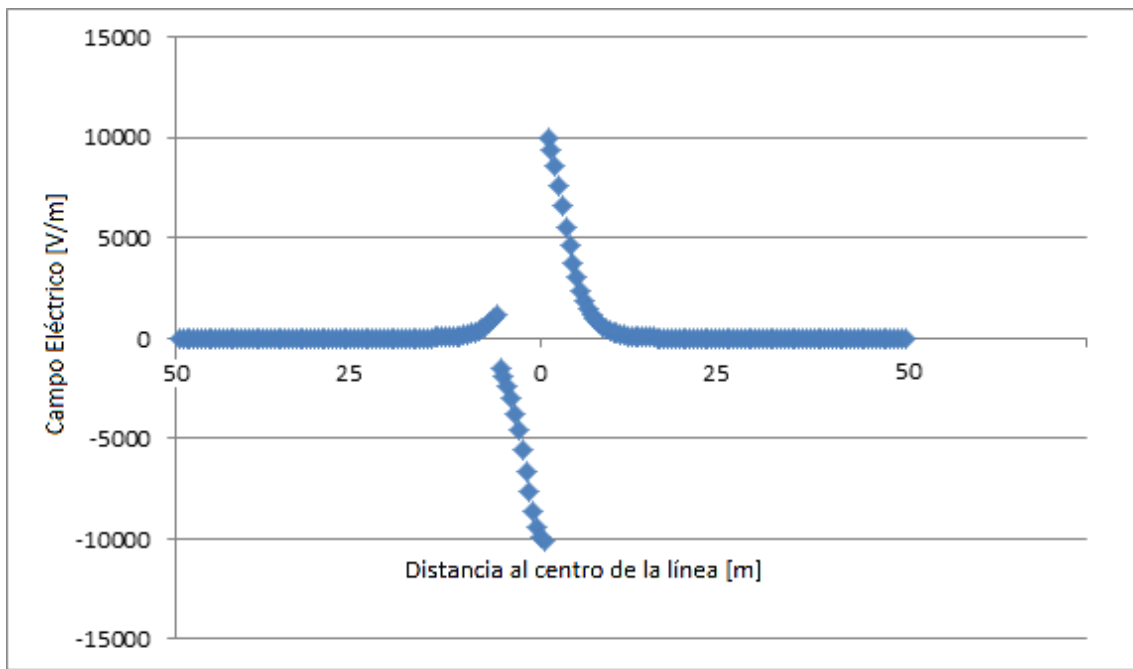


Figura 4.3: Resultado de la simulación para el tipo de conexión 1, a 1 m del suelo.

Se puede apreciar que, si bien se sigue la forma de onda del campo eléctrico, la magnitud del mismo es, a lo más, un tercio de la magnitud registrada en las pruebas de validación realizadas por parte de los autores.

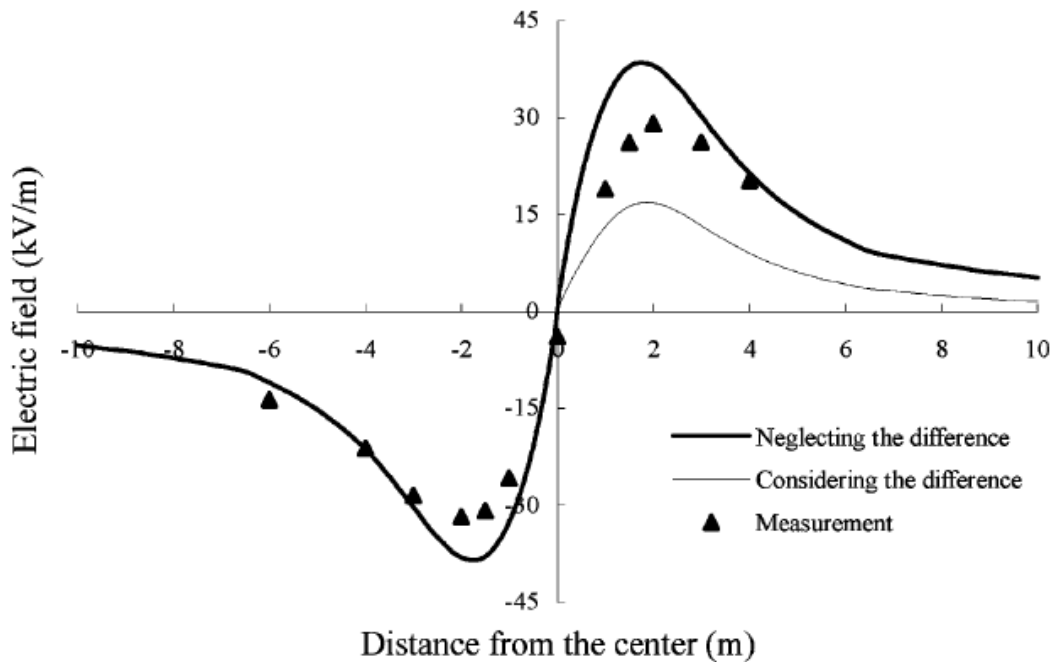


Figura 4.4: Valor medido V/s estimado para el tipo de conexión 2 [3].

Al igual que en el caso anterior, se puede apreciar que, si bien se sigue la forma de onda del campo eléctrico, la magnitud es muy inferior a la medida, y a la simulada por los autores.

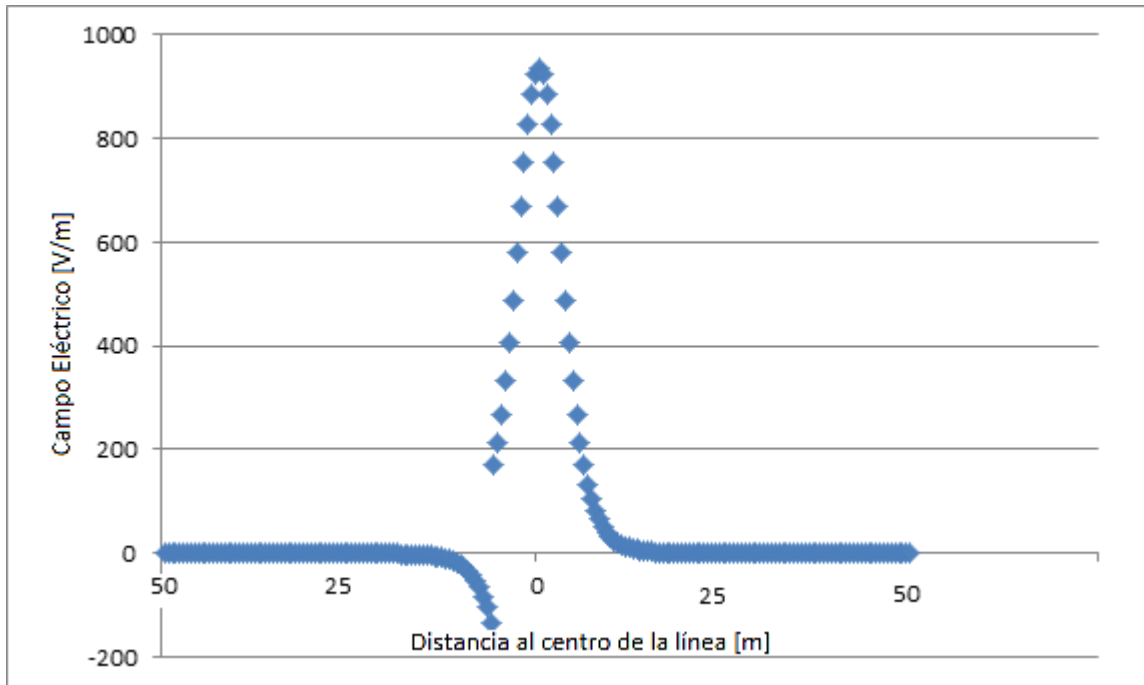


Figura 4.5: Resultados de la simulación a 1 m del suelo, para la conexión tipo 2.

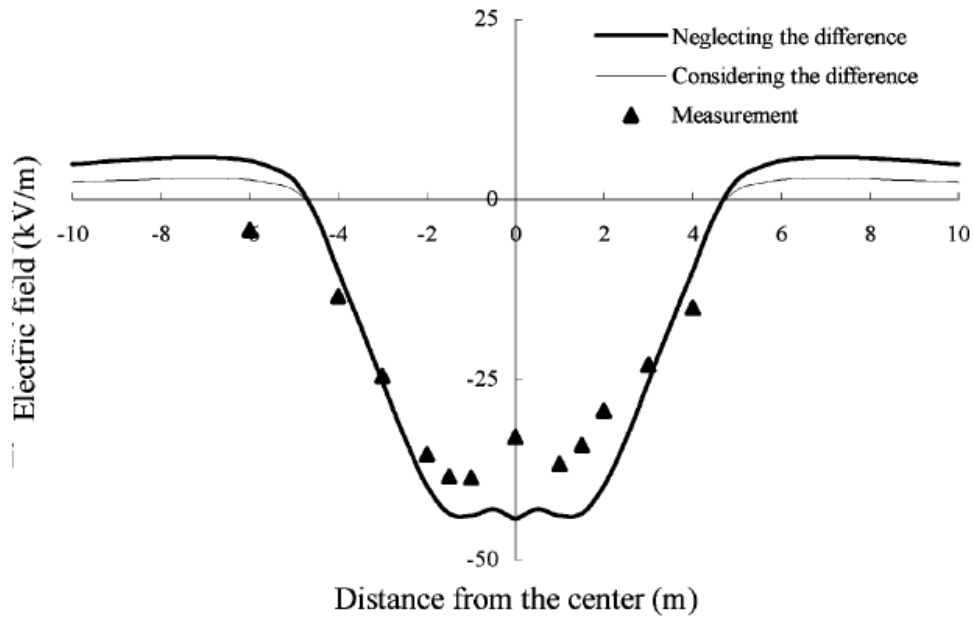


Figura 4.6: Valor medido V/s estimado para el tipo de conexión 3 [3].

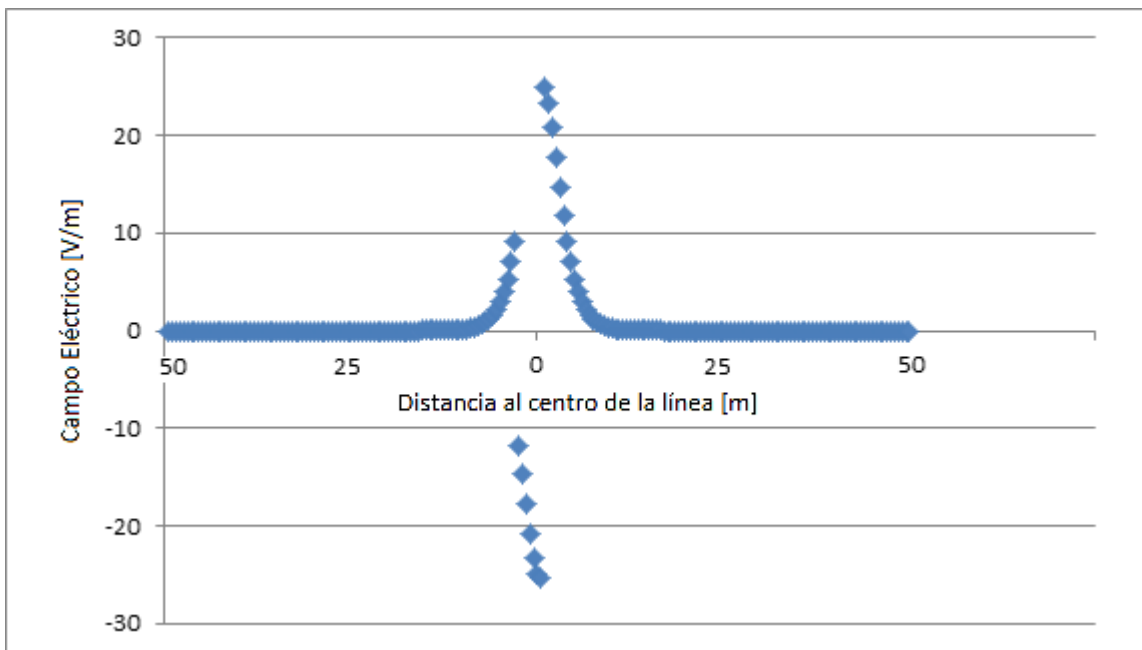


Figura 4.7: Resultados de la simulación a 1 m del suelo, para la conexión tipo 3.

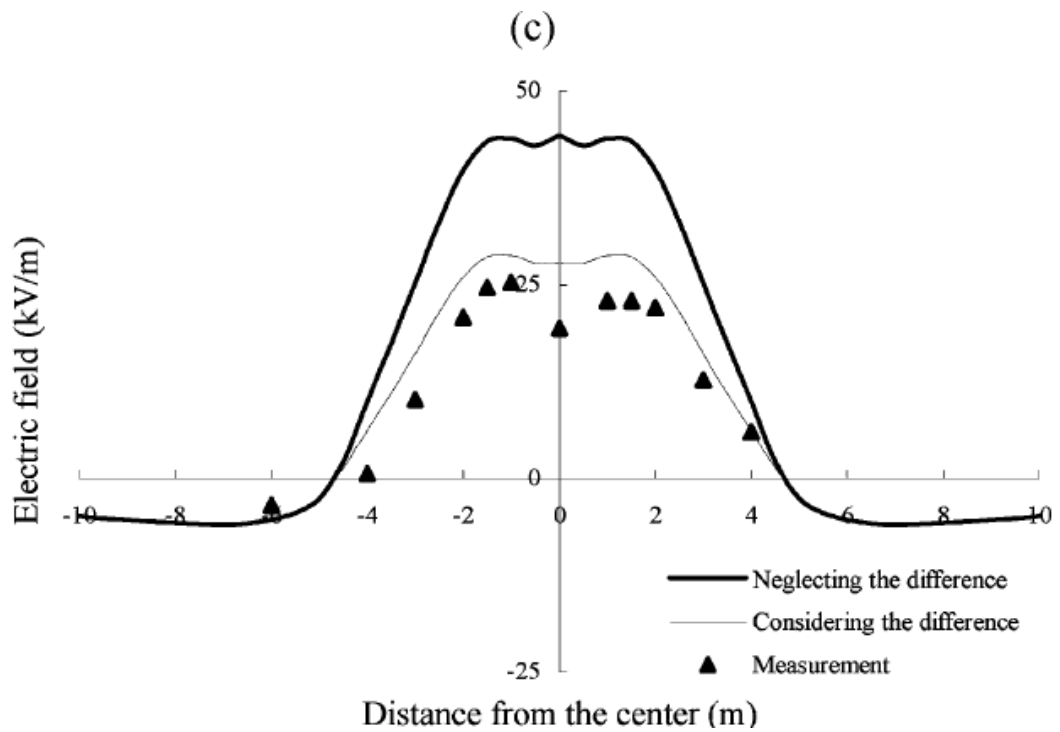
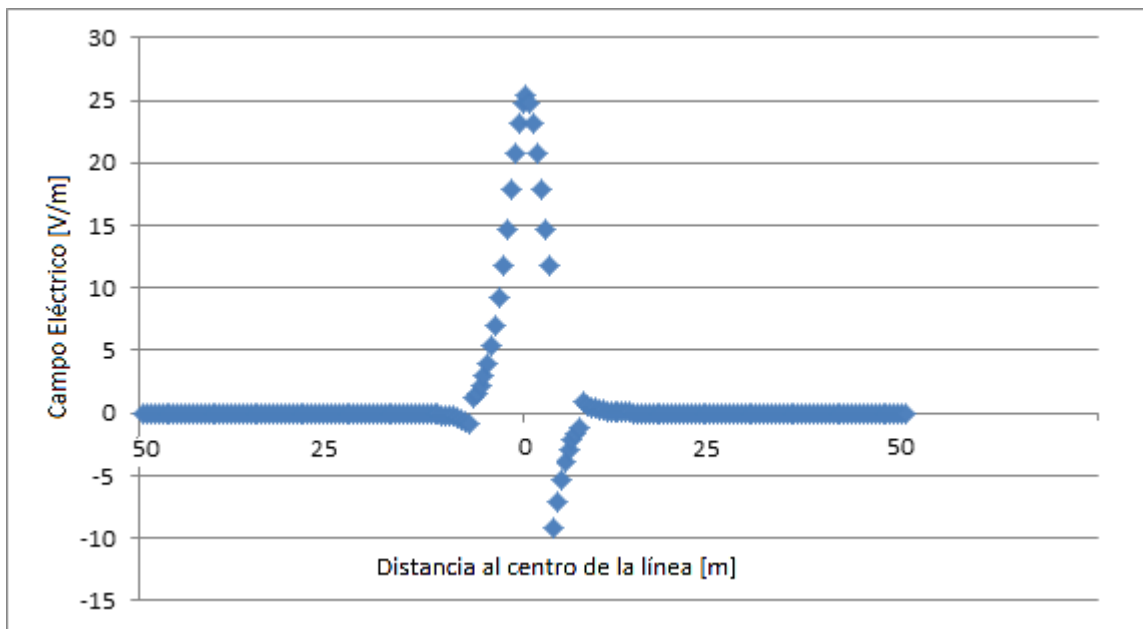


Figura 4.8: Valor medido V/s estimado para el tipo de conexión 4 [3].





**Figura 4.9: Resultado de la simulación a 1 m del suelo, para la conexión tipo 4.**

Se puede apreciar en todos los casos que, se desprecie o no la diferencia entre los efectos corona del polo positivo con el negativo, siempre se sigue la forma y las magnitudes del campo eléctrico ionizado, siendo más fiel el caso de las conexiones tipo 2 y 3, tanto para cuando se considera la diferencia entre el efecto corona de los polos positivos con los negativos, como cuando no.

Además, es posible observar, de manera más analítica, y a modo de respaldo de la teoría, los efectos mencionados en el punto anterior, en lo referente al porqué de las formas del campo resultante bajo las distintas configuraciones de las polaridades de los conductores en la línea.

Con respecto a los resultados obtenidos mediante la aplicación desarrollada, cabe señalar que, si bien se implementaron las dimensiones de la línea de prueba en la aplicación, al desconocer la altura de la torre, simplemente se optó por utilizar la misma altura que para el caso estudiado en el siguiente capítulo, lo que afecta las condiciones de borde que se aplican, y por lo mismo, afecta las magnitudes de los campos medidos a 1 m sobre el suelo. Lo mismo puede explicar los resultados obtenidos en la simulación para las conexiones tipo 3 y 4. Al desconocer las reales magnitudes de la torre utilizada en la prueba realizada por los autores, no se puede llevar a cabo una validación de la aplicación de manera más rigurosa.

### 4.3. Resultados de las simulaciones

#### 4.3.1. Campo eléctrico

A continuación se mostrarán los resultados del campo ionizado en el espacio para cada uno de los distintos tipos de conexiones, de acuerdo a lo mostrado en la figura 2.3, y con una tensión de  $\pm 500$  kV.

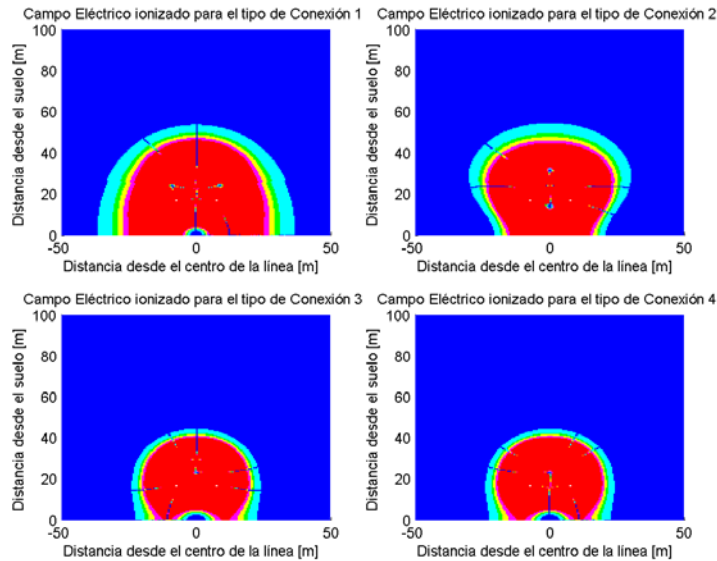


Figura 4.10: Resultado de la simulación para el campo eléctrico ionizado en el espacio, según el tipo de conexiones de los polos.

Se aprecia para el tipo de conexión 1, que el campo eléctrico ionizado se distribuye de manera radial desde el terreno inmediatamente debajo de la línea de transmisión. Se aprecia una zona de baja intensidad de campo eléctrico debajo de la línea de transmisión, lo que se explica debido a las polaridades de los campos eléctricos generados por la línea, los que en esa zona se superponen, generando esa zona de baja intensidad de campo.

Las intensidades de campo eléctrico ionizado mostradas en la figura 4.10 para el tipo de conexión 2 denotan que esta configuración de los polos genera una disminución de la intensidad del campo eléctrico hacia los costados, aumentando, eso sí, su intensidad en dirección vertical, lo que se aprecia en la zona cercana al suelo.

Las otras dos configuraciones son similares en comportamiento, debido a que cada una agrupa en un mismo nivel de altura las polaridades del mismo signo, disminuyendo los efectos en el espacio del campo eléctrico ionizado, junto con la magnitud del campo eléctrico resultante.

Cabe agregar, con respecto a las “líneas de campo de poca intensidad”, que se pueden apreciar en los diagramas como una suerte de líneas azules de campo de baja intensidad al interior de campos de mayor magnitud, que la forma en la que fueron graficados cada intervalo corresponde al promedio del cuadrante respectivo, por lo que esta clase de comportamiento se puede explicar debido a que este promedio fue calculado utilizando campos de diferente polaridad, pero similares magnitudes, produciéndose estas líneas entrando en el diagrama del campo.

A continuación, se muestran los 4 perfiles de las magnitudes del campo eléctrico ionizado, obtenidos para cada uno de los tipos de configuraciones de conexiones de los polos en la línea.

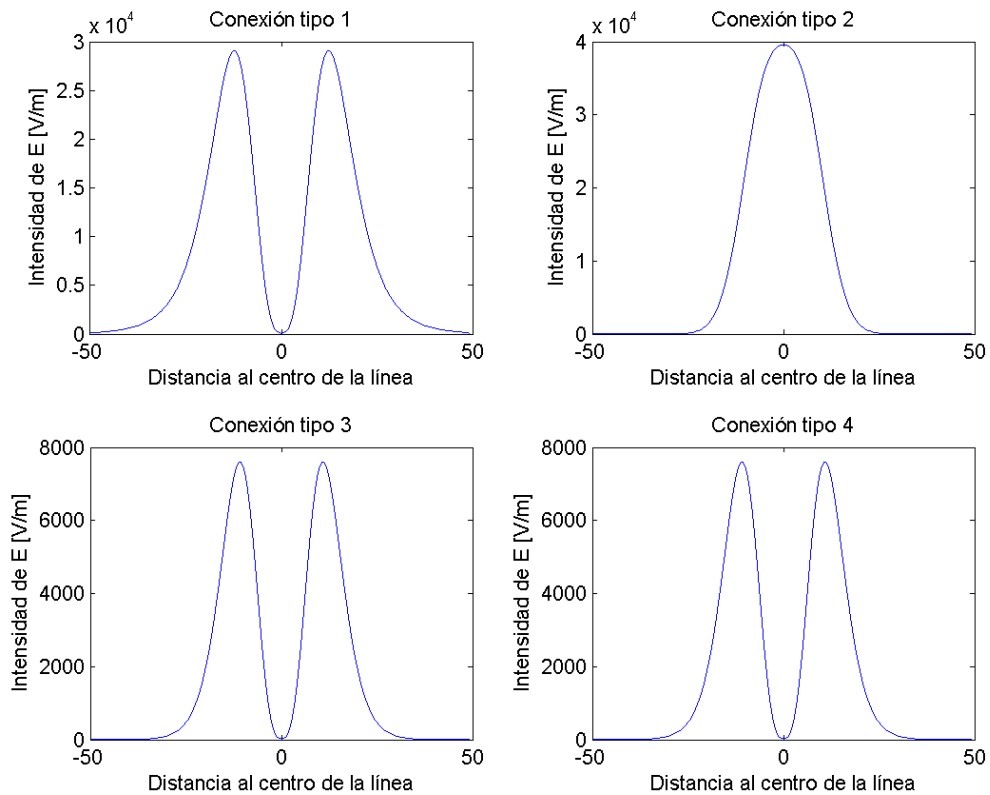


Figura 4.11: Perfiles de Campo Eléctrico ionizado para los 4 tipos de conexiones, en V/m, a 1 metro sobre el suelo.

Estas magnitudes de campo eléctrico ionizado fueron obtenidos a 1 metro por sobre el nivel del suelo. Se puede apreciar que las mayores magnitudes de campo eléctrico se obtienen para los tipos de conexiones 1 y 2. Esto se debe a que la configuración de los polos es propicia para que las cargas espaciales tengan mayor efecto en cómo se distribuye el campo eléctrico en el espacio, no contribuyendo a anular sus efectos sino que todo lo contrario, potenciando la influencia del campo generado por un arreglo de conductores en los demás. Por otra parte, se puede apreciar la mayor área de influencia del campo eléctrico para la configuración de conexiones tipo 1, por sobre el resto de las configuraciones. Esto se explica por el hecho de que la configuración de las

polaridades en el tipo de conexión no permiten que, al superponerse, los campos eléctricos generados por cada arreglo de conductores se “anulen”.

Los otros dos arreglos, tal y como se esperaba, generan campos de magnitudes mucho menores, y muy similares el uno del otro, lo que se explica por la configuración de las polaridades de los arreglos de conductores, los que hacen que, al superponerse los campos generados por cada arreglo de conductores, estos se “compensen”, disminuyendo su magnitud, y concentrando su zona de influencia en un área mucho más cercana a los conductores de la línea que en las otras dos configuraciones, disminuyendo, al mismo tiempo, el efecto de las cargas espaciales en el campo eléctrico.

Esto se ve explicado de mejor forma al subir desde el nivel del suelo.

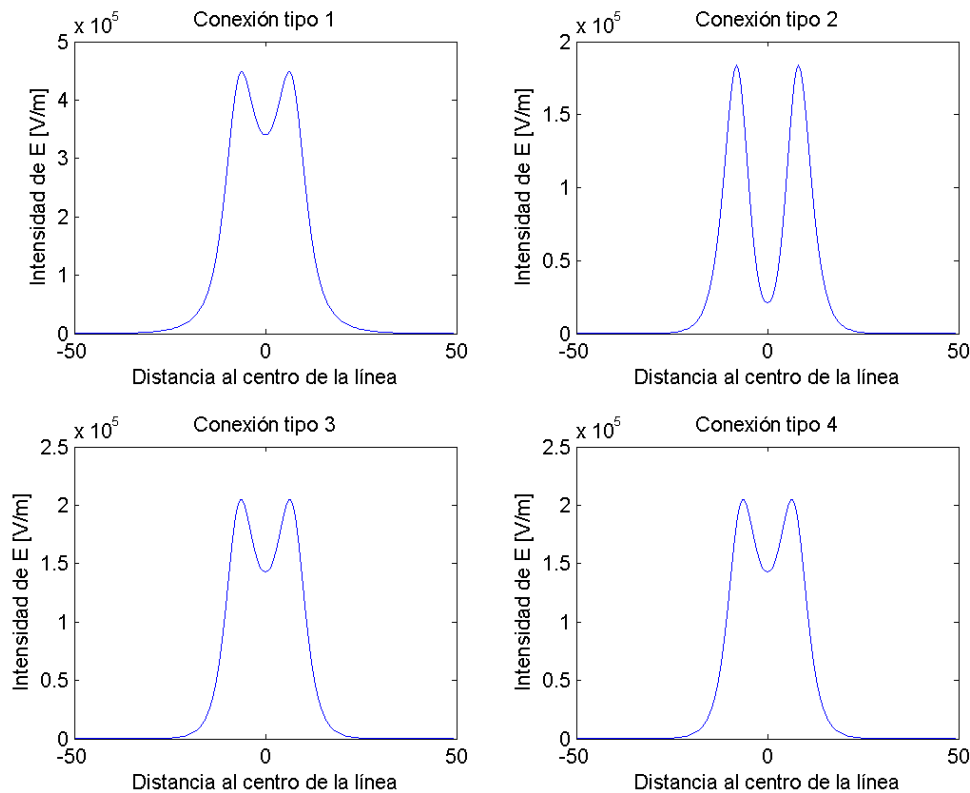
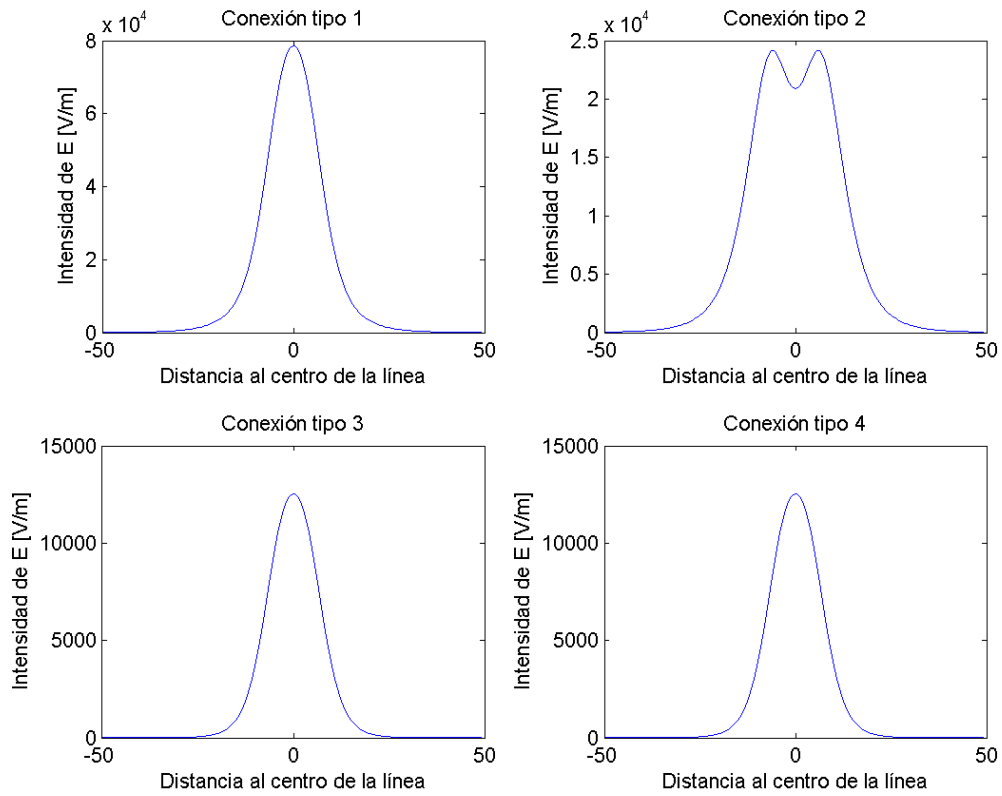


Figura 4.12: Campo eléctrico al centro de la línea de transmisión para los distintos tipos de conexiones (23.25 m).

Se puede apreciar que el campo eléctrico se concentra mayoritariamente al centro de la línea de transmisión, en donde las mayores magnitudes se obtienen, aproximadamente, por sobre la superficie de los conductores, en los 4 casos. Esto se explica, principalmente, debido a que los voltajes inducidos en la superficie de cada arreglo de conductores por los demás, y por ende el campo eléctrico ionizado, es máximo en estos puntos del plano paralelo al suelo.

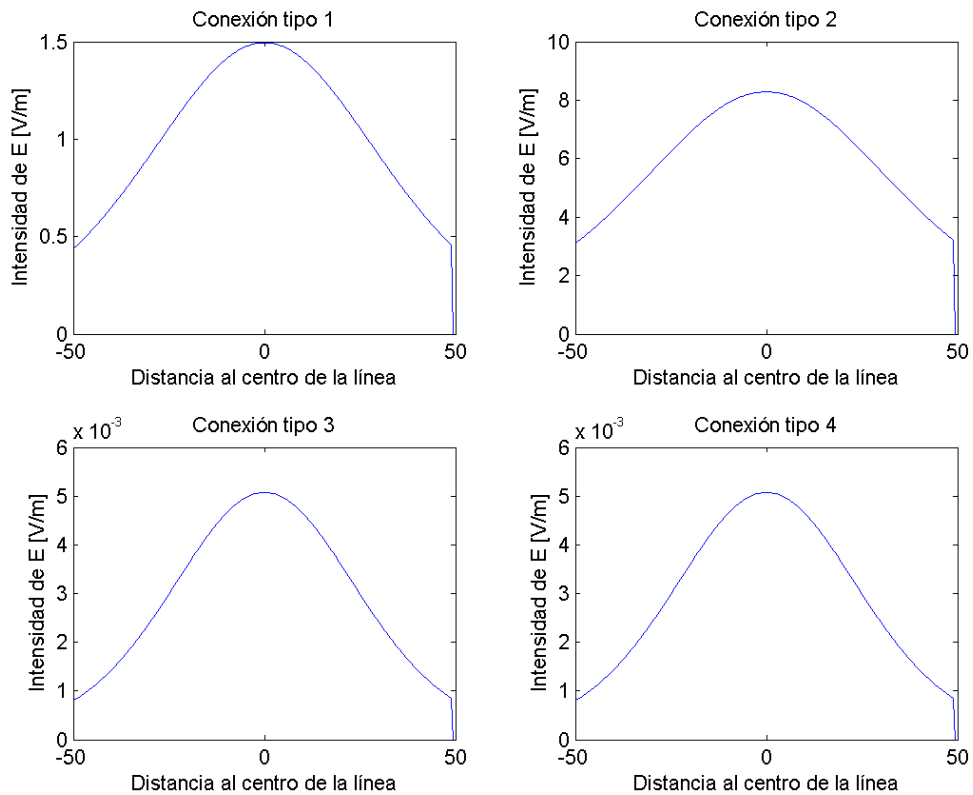
Además, se puede apreciar que en el centro mismo de los arreglos de conductores, los campos eléctricos generados por cada uno, se “compensa”, mostrando que la superposición de los campos eléctricos en el centro de la línea es máxima, anulándose en esta área, en todos los tipos de conexión.

También es posible apreciar que, en este plano, la distancia a la que el campo eléctrico ejerce “influencia” es similar en los cuatro casos.



**Figura 4.13: Magnitudes de Campo Eléctrico ionizado a 40 metros por sobre el nivel del suelo.**

En la figura 4.13, se puede apreciar que se confirma lo dicho anteriormente, al ser los tipos de conexión 1 y 2 los que mayor magnitud de campo eléctrico presentan, sobre todo en la zona que se encuentra arriba del centro de la línea de transmisión, que es donde se puede apreciar de mejor manera la superposición de los campos eléctricos.



**Figura 4.14: Magnitud del Campo Eléctrico ionizado a 100 metros sobre el suelo.**

Finalmente, se puede apreciar que en las zonas más alejadas a la línea de transmisión, las magnitudes de los campos eléctricos ionizados resultantes disminuyen, mostrando que el campo eléctrico en las conexiones tipo 1, 3 y 4 se concentra en las zonas cercanas a la línea de transmisión, apreciándose bajas magnitudes en las zonas alejadas de la misma, sobre todo en los casos de las conexiones 2 y 3, en donde, tal y como salta a la vista, la magnitud del campo eléctrico generado a esa distancia, más bien, inocua.

Si estos resultados se comparan con los obtenidos para el caso de un bipolo en la línea de transmisión, se puede apreciar que, en todos los casos, las magnitudes de los campos eléctricos son muy inferiores a las registradas en este trabajo [15], tal y como muestra la siguiente figura, dado que, si bien es mayor la carga que cada conductor debe transportar, el menor número de polos hace más factible que el campo generado en un polo se “mitigue” con el campo generado por el otro polo.

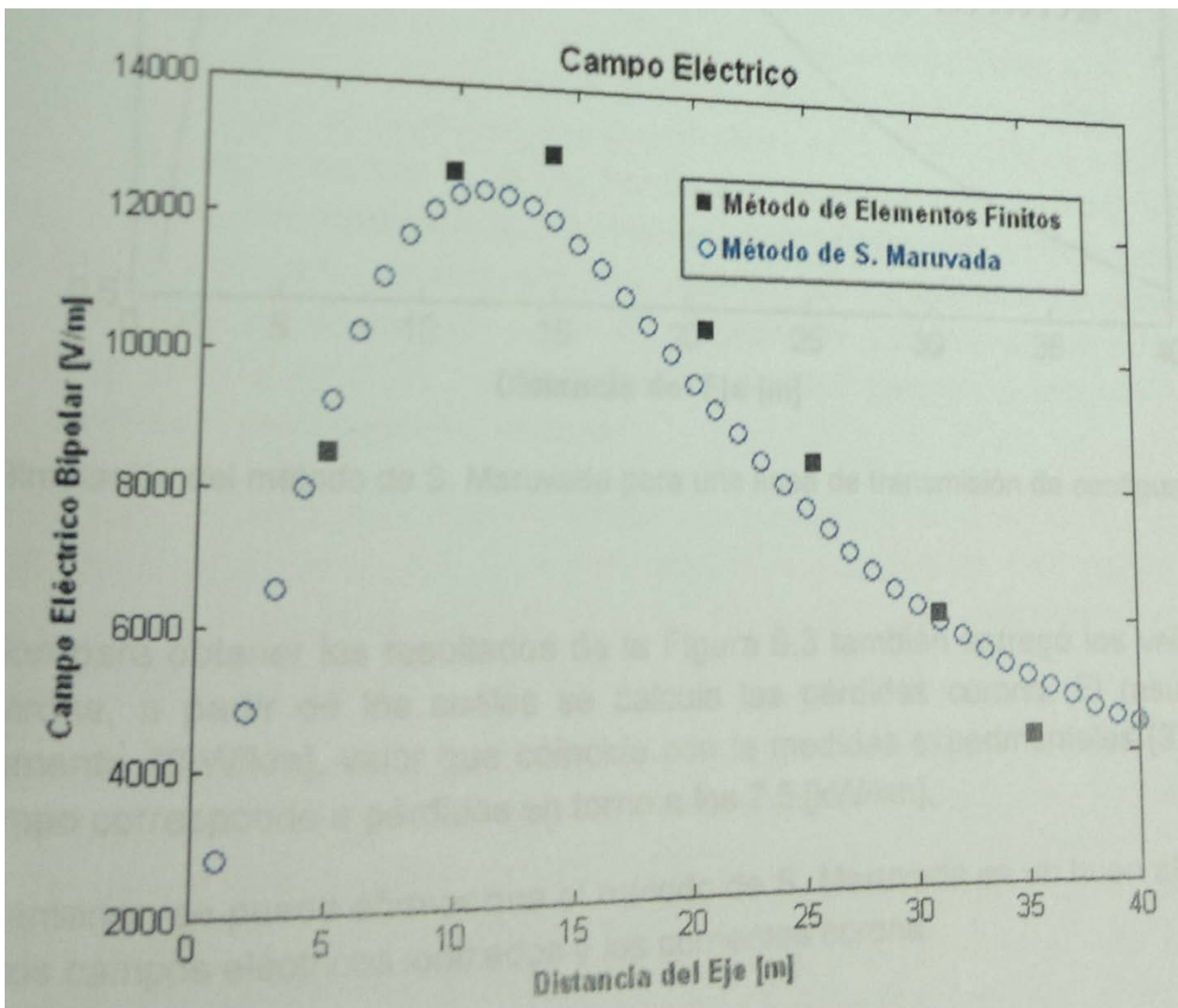


Figura 4.15: Valores de campo eléctrico estimados con distintos métodos para el caso de un solo bipolo en la línea [15].

Ahora bien, desde el punto de vista de seguridad tanto para público en general como para trabajadores que realicen operaciones de mantenimiento en la línea de transmisión, ninguna de las configuraciones de conexión de las polaridades de los arreglos de conductores, en el plano central de la línea de transmisión, cumple con las normas de seguridad para la exposición prolongada a campo eléctrico, ya que se puede apreciar que, en este plano al menos, las magnitudes alcanzadas son demasiado altas en comparación a las recomendaciones de las normas señaladas anteriormente.

#### 4.3.2. Radio Interferencia

Este parámetro depende netamente de las características físicas y constructivas de la línea, más que de parámetros electromagnéticos, salvo el campo eléctrico generado en el entorno de los conductores, principalmente de polaridad positiva.

Sin embargo, y a través de la tabla 2.5, es posible estimar el valor de la Radio Interferencia para la línea de transmisión en comento, de acuerdo a sus características constructivas mostradas en la figura 2.2, obteniendo un valor estimado de  $43.6 \text{ dB} \frac{\mu V}{m}$  [1] [7].

### 4.3.3. Pérdidas Corona

Aprovechando que los parámetros de la línea de transmisión en comento se ingresan en el software desarrollado, este, utilizando la fórmula 2.38, calcula las pérdidas corona, con una potencia inyectada de 2700MVA, obteniéndose pérdidas corona de  $1.2423 \text{ dB} \frac{kW}{\text{circuito-km}}$ , lo que es un valor bastante más bajo de lo esperado, en comparación con el caso de un circuito. Esto se debe a que, al ser doble circuito, la línea de transmisión en estudio tiende a “anular” los efectos de las pérdidas corona de un circuito con el otro, principalmente porque la corriente ahora se distribuye por el doble de número de subconductores, lo que, hablando en términos de un solo conductor equivalente, corresponde a un conductor de mayor diámetro que en el caso de un bipolo de un solo circuito [1] [5].

### 4.3.4. Ruido audible

Para el caso del ruido audible, al igual que en el caso de las pérdidas corona, utilizando los resultados obtenidos desde la iteración de la aplicación, y tomando en cuenta el campo eléctrico resultante promedio al centro de los polos, se tiene un ruido audible de 182.4237 [dBA] para la conexión tipo 1, 187.1169 [dBA] para el caso de la conexión tipo 2, y de 294.1549 [dBA] para los casos de las conexiones 3 y 4, medidos directamente desde el suelo situado bajo la torre, lo que en términos de sonido A-ponderado, corresponden a 160.9935 [Pa], 165.6867 [Pa] y 272.7247 [Pa] respectivamente, lo que es mucho mayor que el ruido esperado, tomando en consideración el caso de una línea de un solo circuito. Esto se debe a que el nivel de iones en el espacio encontrados en este caso, es mucho mayor que en el caso de una línea bipolar de solo un circuito [6] [15], lo que redundo en una mayor vibración de las partículas de aire, generando estos niveles de ruido audible.

Se puede apreciar, además, que el nivel de ruido audible generados para las conexiones 1 y 2 son casi la mitad del ruido producido en las otras configuraciones, lo que se explica debido a que la densidad de cargas en estos dos últimos casos se concentra más en torno a los conductores que en los casos 1 y 2.

### 4.3.5. Campo magnético

A continuación se muestra el resultado de la simulación para el campo magnético en el espacio.



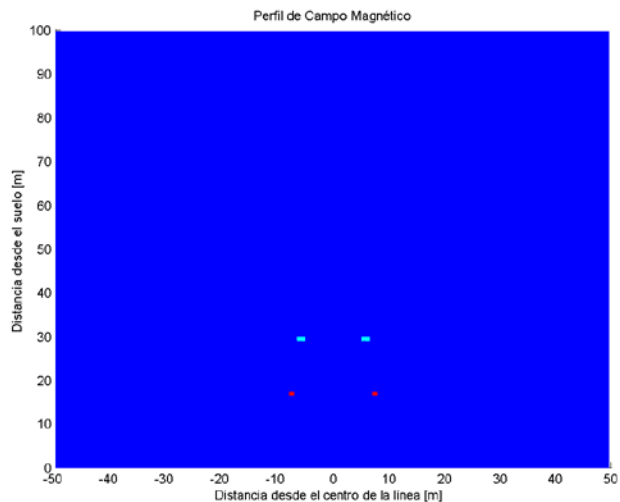


Figura 4.16: Resultado del cálculo del Campo Magnético.

Como se puede apreciar, el efecto del campo magnético es muy poco, concentrándose principalmente en la zona circundante a la superficie de los subconductores de cada polo.

Dada la escasa magnitud del campo magnético en todo el espacio que rodea a la línea de transmisión, los efectos producidos por este son casi nulos.

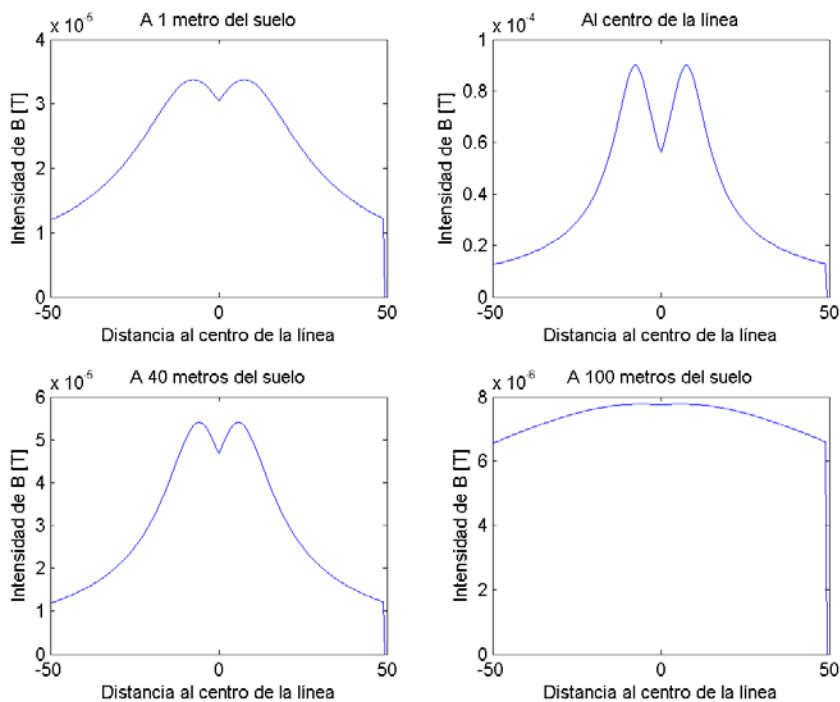


Figura 4.17: Campo Magnético a distintas alturas sobre el nivel del suelo.

En efecto, como se puede apreciar en los perfiles de campo magnético obtenidos en la simulación a distintas alturas desde el nivel del suelo, y teniendo en cuenta las normas de seguridad para las magnitudes de campo magnético mostradas anteriormente, estos no significan un riesgo relevante tanto para las personas que realicen labores de mantenimiento en la línea, u otro tipo de labores propias de este tipo de instalaciones, ni para el público en general, ni siquiera en la zona en la que se genera un campo de mayor intensidad, que es, tal y como se esperaba debido a la superposición de los campos en esa zona, en el centro de la línea de transmisión. Es posible inferir, además, que estos niveles de campo magnético no son nocivos para la fauna nativa que se pueda encontrar en las zonas aledañas a la línea de transmisión.

#### 4.3.6. Densidad de carga espacial

A continuación se muestra el resultado de las simulaciones para la intensidad de la densidad de carga espacial para cada uno de los tipos de conexión mostrados en la figura 2.

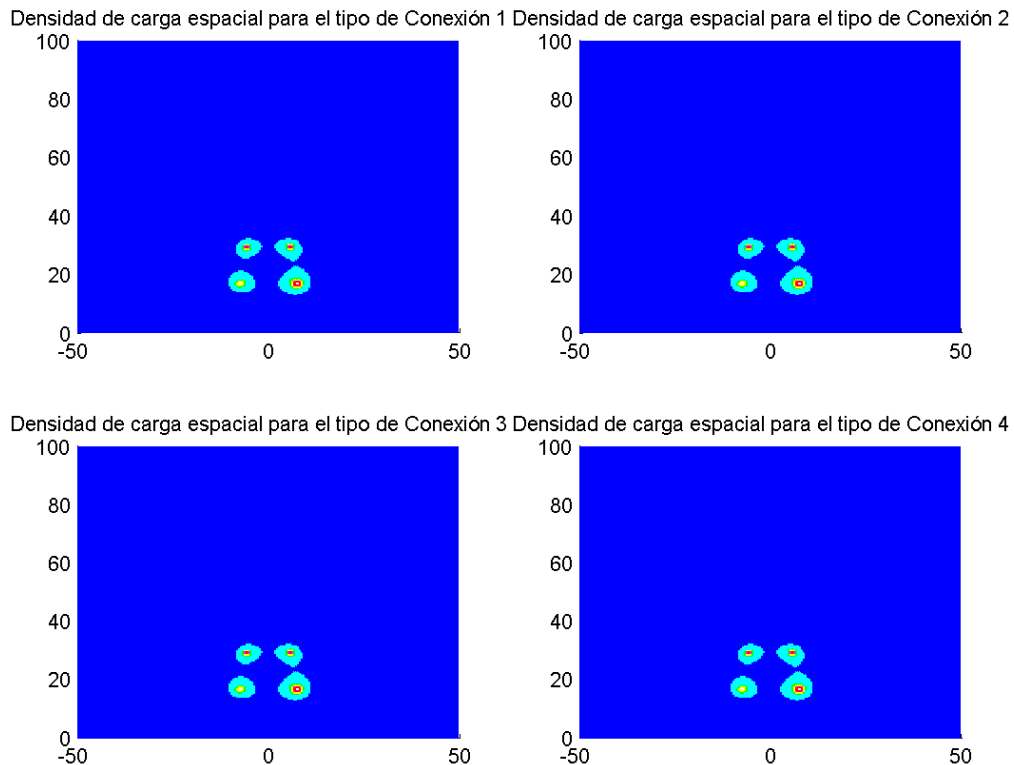


Figura 4.18: Densidades de carga espacial para los distintos tipos de conexión.

Como se puede apreciar, la mayor magnitud de densidad de carga espacial se concentra en torno a los conductores, lo que, en cierto modo, era de esperarse, dado el potencial que se genera en el espacio vecino a los conductores de la línea [8].

Esto puede favorecer la inducción de cargas que podrían ser peligrosas tanto en objetos como personas, por lo que se es un efecto del que se debe tener cuidado. Sin embargo, se puede inducir que, al estar más concentrada la carga espacial en torno a los conductores de la línea, el alejarse una cierta distancia de los mismos disminuirá ostensiblemente el riesgo de inducción de cargas.

Por otra parte, se puede apreciar que, en los cuatro casos, las magnitudes de las densidades de carga que se generan en torno a los conductores son casi iguales, siendo las densidades de carga ubicadas en torno a los conductores de la parte inferior de la línea de mayor magnitud que las densidades de carga en torno a los conductores superiores. Esto se debe a las condiciones de borde planteadas en la ecuación 2.16, en particular, la condición que plantea que los potenciales tanto libres de carga como bajo carga espacial sean nulos en la superficie del suelo, lo que fuerza, de cierta manera, a los conductores inferiores a “neutralizar” los efectos de los conductores superiores, con el fin de dar cumplimiento a esta condición de borde.

Esto se ve reflejado en los gráficos que a continuación se muestran, y en los que se puede apreciar, a distintos niveles sobre el suelo, como varía la magnitud de la carga espacial al acercarse o alejarse de los arreglos de conductores, para cada una de las distintas configuraciones de las polaridades en la línea de transmisión.

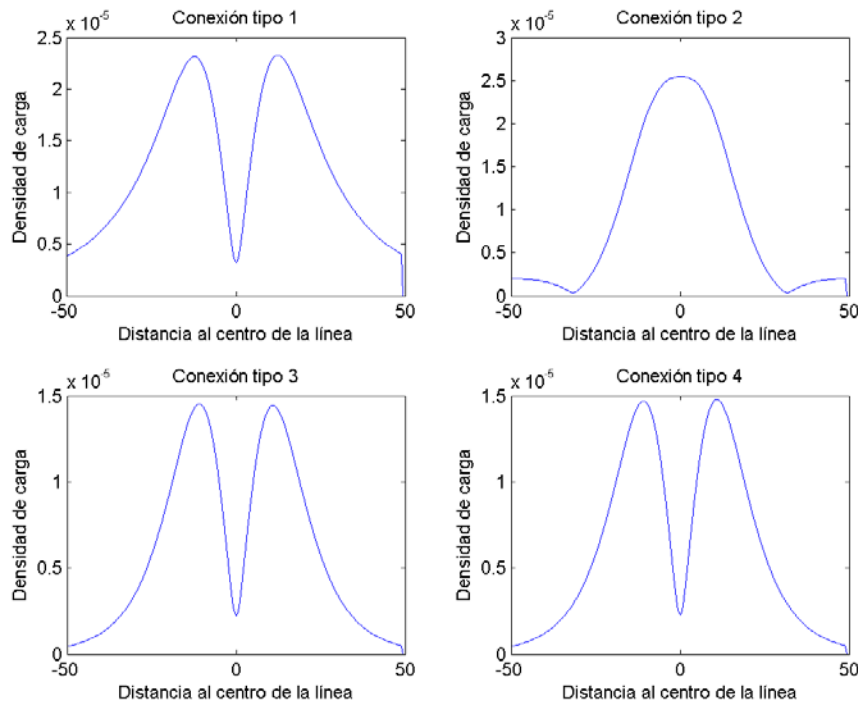
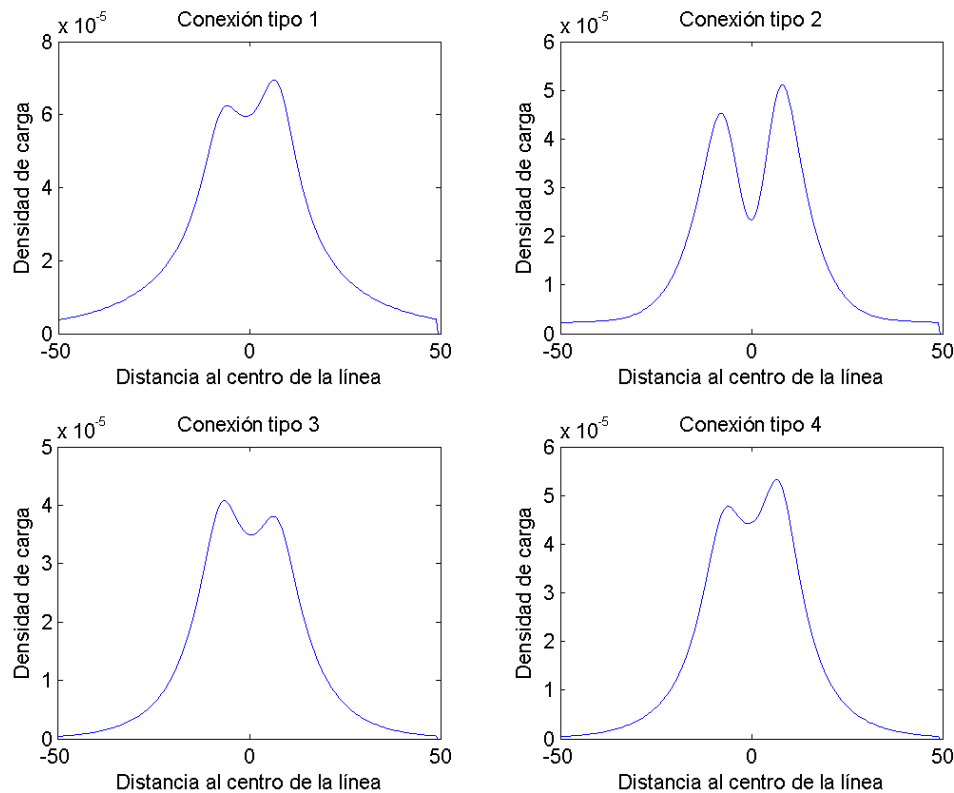


Figura 4.19: Densidad de carga a 1 metro sobre el suelo.

Se puede apreciar que la configuración de polaridades tipo 2, a 1 metro por sobre el nivel del suelo, es la que concentra de mejor manera la carga espacial en torno a la línea de transmisión. Sin embargo, es la configuración que, a esta altura sobre el suelo, más probabilidades de inducir corrientes en superficies conductoras tiene, debido a que presenta la mayor magnitud de densidad de carga en este plano, lo que explica el alto valor del campo eléctrico ionizado a esta altura para este tipo de conexión.

Como era de esperarse, los tipos de conexiones 3 y 4 son las configuraciones que menores densidades de carga espacial generan a esta altura, lo que explica que sean las configuraciones de polaridades que menores magnitudes de campo eléctrico generan.

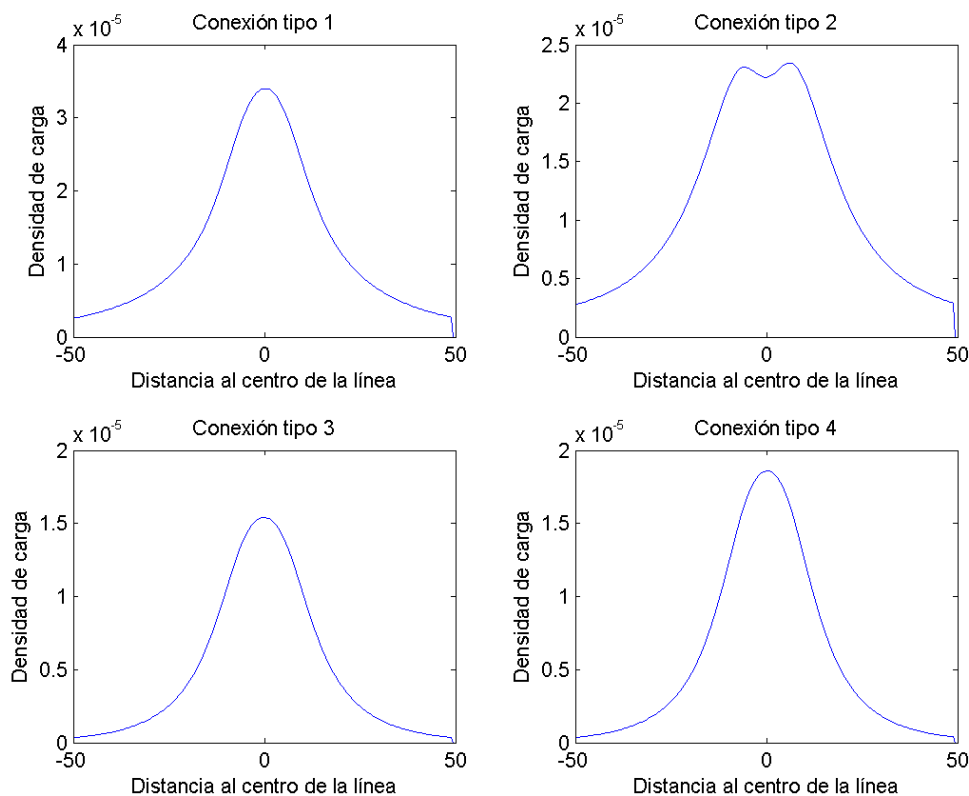
A continuación, se muestran las magnitudes de densidades de carga inducida a 23.25 m desde el suelo, es decir, en el plano paralelo al terreno que pasa por el centro de los arreglos de conductores.



**Figura 4.20: Densidad de carga al centro de la línea de transmisión.**

Se puede apreciar que las magnitudes suben considerablemente, debido a la proximidad de los conductores en este plano. Es posible apreciar que las cargas espaciales, en la conexión tipo 2, influyen en la baja magnitud del campo eléctrico ionizado al centro de la línea de transmisión.

Sin embargo, se muestra que esta misma configuración es mucho más uniforme en lo que se refiere a “ordenar” las cargas espaciales en una suerte de plano vertical, que tiende a no alejarse demasiado del centro de la línea de transmisión, induciendo la misma densidad de carga espacial que los casos 3 y 4, que son los casos que menores densidades de carga inducen.



**Figura 4.21: Densidad de carga a 40 metros sobre el suelo.**

Por otra parte, ya a los 40 metros por sobre el nivel del suelo se puede apreciar una baja sustancial de la densidad de carga espacial en las 4 configuraciones de polaridades para las que se simuló el campo eléctrico ionizado, lo que se aprecia de mejor forma en la siguiente figura, que muestra la densidad de carga espacial a 100 metros por sobre el nivel del suelo.

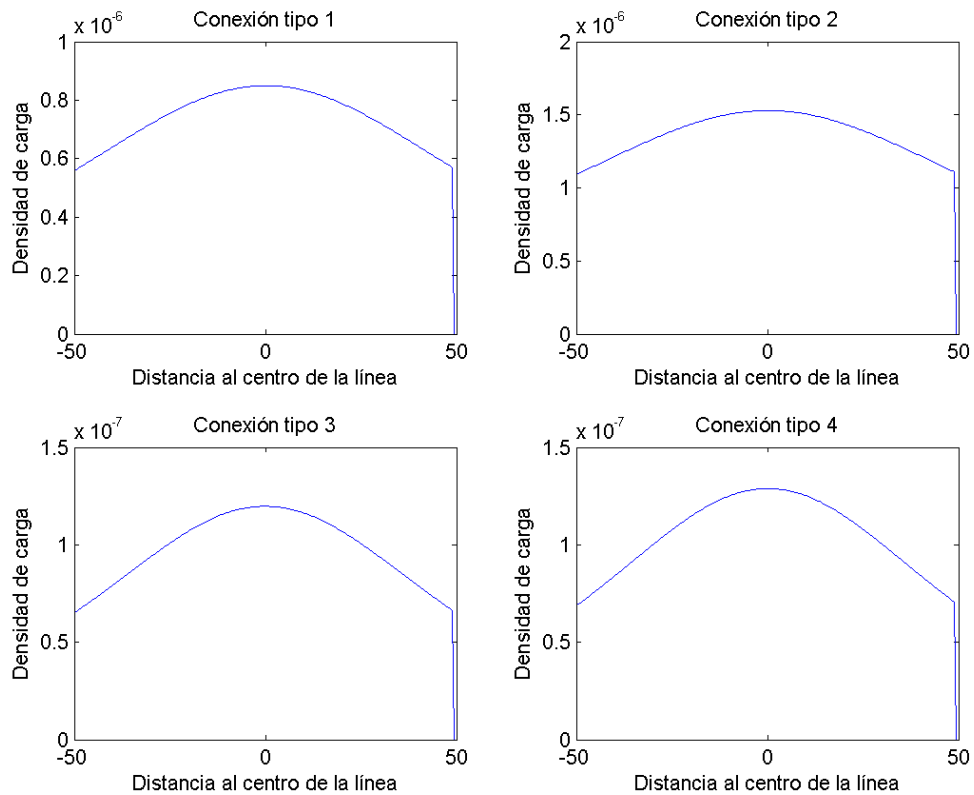


Figura 4.22: Densidad de carga a 100 metros sobre el suelo.

Finalmente, es posible afirmar, a la luz de las figuras que muestran la magnitud de las densidades de carga espacial a diferentes alturas sobre el suelo, que, producto de las condiciones de borde, que imponen que tanto el potencial no ionizado como el potencial ionizado, y los campos eléctricos libres de carga espacial e ionizados, deben ser nulos en la superficie del terreno, las cargas espaciales tienden a “agruparse” en la zona baja de la línea, con el fin de “anular” los potenciales y los campos eléctricos en la superficie del terreno.

## 5. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo de título se vio el desarrollo de un modelo computacional aproximado para el cálculo del campo eléctrico, y algunos de los efectos más notables que deben ser tomados en consideración para una línea de transmisión de doble circuito en HVDC, efectos que fueron mostrados para la línea de transmisión de doble circuito mostrada en la figura 5, para los 4 distintos arreglos de polos mostrados en la figura 2, la cual es un estándar en este tipo de sistemas de transmisión.

Por otra parte, se vio que ciertos modelos estudiados son válidos solamente bajo ciertas condiciones climáticas y ambientales, de lo que se deduce que existen más elementos que afectan

el campo eléctrico generado, tanto ionizado como libre de cargas espaciales. Desde ese punto de vista, se evaluaron diversos modelos y alternativas de modelación, sobre todo para el campo eléctrico, mostrándose en este trabajo solamente aquellos que fueron implementados en el software desarrollado, el cual, al final, muestra de manera gráfica los resultados para el campo eléctrico ionizado.

Se mostró además el nivel que se alcanza para el resto de las variables estudiadas, comparándolas, en cierta forma, con el caso de una línea bipolar de un solo circuito, justificando el porqué de las diferencias entre un caso y otro. En esto cabe destacar que el método que se utilizó en este modelo aplica el supuesto de Deutch [1], el cual quita validez y precisión a la aplicación, frente a otros métodos que, en cambio, son más difíciles de realizar en la práctica, lo que se corroboró durante el desarrollo de este trabajo.

En lo referente al campo magnético, al ser este un campo estático, la magnitud y los efectos que este presenta en este tipo de transmisión de energía eléctrica son muy bajos, siendo nula la corriente inducida en objetos o personas cercanas.

Se pudo verificar que algunos de los efectos estudiados (en particular, las pérdidas corona y el ruido audible) casi no dependen, o derechamente no dependen, de los valores del campo eléctrico, siendo, en el caso de las pérdidas corona, totalmente independiente de los valores de la mencionada variable, considerando solamente parámetros constructivos de la línea, y su voltaje de operación.

En relación a los otros efectos estudiados, el ruido audible y la radio interferencia, estos se producen en torno a los polos positivos, principalmente debido a que son efectos asociados a las pérdidas corona, la que se da, mayoritariamente, en torno a los polos de la mencionada polaridad.

Las líneas de corriente continua producen efectos capacitivos, producto de su naturaleza estática, por lo que inducen voltajes en los objetos cercanos. Producto de las cargas espaciales producidas por el campo eléctrico, es posible que se induzcan cargas en objetos cercanos.

Finalmente, es importante destacar que esta aplicación tiene por objeto solamente servir como referencia en cuanto a la toma de decisiones relativas al diseño e implementación de una línea de transmisión en HVDC, indicando solamente órdenes de magnitud o aproximaciones a los que son los valores reales de los efectos estudiados.

A modo de trabajos futuros tendientes a mejorar lo hecho en este trabajo, se mencionan las siguientes actividades.

- **Implementar el método de los elementos finitos para la estimación del campo eléctrico, u otro método más exacto.** Esto, ya que este método es mucho más

preciso que el implementado en este trabajo, al no utilizar el supuesto de que la carga espacial afecta solamente la magnitud del campo eléctrico, mas no su dirección.

- **Trabajar en un método más general en lo relativo a las condiciones climáticas.** Si bien muchos de los métodos y ecuaciones utilizados en este trabajo son aplicables a buen y mal clima, existen métodos que solo son válidos para buen clima. Además, es importante añadir el efecto que el viento tiene
- **Mejorar la interfaz de usuario.** Es sabido que en toda aplicación, sin importar si está enfocado a la academia o a la industria, la interacción con el usuario es importantísima, ya que, al final, es el usuario final el que valida o no si la aplicación le es útil.
- **Optimización del software para una utilización más eficiente de los recursos computacionales.** La manera en la que este cálculo es realizado consume muchos recursos del equipo en el que se ejecute, tomando, además, demasiado tiempo en la resolución de la simulación. El uso de otro lenguaje de programación, que permita la ejecución por *threads* o hilos, permitirá ahorrar tiempo en la ejecución del programa, además de optimizar el uso de los recursos de *hardware* disponibles.
- **Exportación del algoritmo a otro lenguaje de programación.** Un lenguaje de programación más “tradicional” como C++ o Python ofrece muchas más posibilidades como desarrollador. Sin embargo, se pierde la ventaja que presenta MatLab con respecto a dichos lenguajes, que es el manejo de las operaciones matemáticas, numéricas y matriciales, las que se deberán implementar de manera “manual” en los otros lenguajes, en caso de ser necesario.
- **Agregar más efectos generados por la operación de la línea al modelo.** Es posible agregar más efectos generados por la operación de la línea de transmisión a la simulación, como, por ejemplo, la generación de ozono en torno a los conductores de la línea.
- **Agregar factores de corrección relativos al estado del conductor.** No solo la humedad relativa del aire, la velocidad del viento o la presión atmosférica alteran el campo eléctrico ionizado generado en torno a la línea de transmisión, sino que también el estado de los conductores influye, como lo es el grado de contaminación de los mismos, o el estado físico de los mismos [1] [10], por lo que un factor de corrección que permita considerar estos estados de los conductores permitirá una mejor predicción del campo generado por la línea de transmisión en períodos prolongados de tiempo, pudiendo establecer de mejor manera protocolos de mantenimiento de las líneas y sus conductores.



## 6. Referencias

[1] **Harold L. Hill, A. Stanley Capon, Otto Ratz, Phillip E. Renner, William D. Schmidt.** *Transmission Line Reference Book – HVDC to  $\pm 600$  kV*. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1976.

[http://books.google.cl/books/about/Transmission Line Reference Book HVDC to.html?id=YjJbGQAACAAJ&redir\\_esc=y](http://books.google.cl/books/about/Transmission+Line+Reference+Book+HVDC+to.html?id=YjJbGQAACAAJ&redir_esc=y)

[2] **Nelson Morales Osorio.** Apuntes del curso EM719: Ingeniería de Alta tensión, de la Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

[3] **Yong Yang, Jiayu Lu, Yinzha Lei.** *A Calculation Method for the Electric Field Under Double-Circuit HVDC Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, Páginas 1736-1742. Octubre 2008.

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4511481&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F61%2F4626339%2F04511481.pdf%3Farnumber%3D4511481>

[4] **Bo Zhang, Jinliang He, Rong Zeng, Shanqiang Gu, Lin Cao.** *Calculation of Ion Flow Field Under HVDC Bipolar Transmission Lines by Integral Equation Method*. IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 43, No. 4, Páginas 1237-1240, Abril 2007

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4137679&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F20%2F4137654%2F04137679.pdf%3Farnumber%3D4137679>

[5] **Paolo Pelacchi, Umberto Corbellini.** *Corona Losses in HVDC Bipolar Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, Páginas 1475-1481, Julio 1996.

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=517506&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel3%2F61%2F11105%2F00517506.pdf%3Farnumber%3D517506>

[6] **V. L. Chartier, R. D. Stearns.** *Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead High Voltage AC and DC Lines*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 1, Páginas 121-130 Enero 1981.

[7] **E.R. Schroeder, B.S.E.E., and R.V. De Vore.** *Radio interference on DC lines from HVDC convertor stations*. IEEPROC, Vol. 129, Pt. C, No. 5, Páginas 221-227, Septiembre 1982.

[8] **Wei Li, Bo Zhang, Jinliang He, Rong Zeng, Shuiming Chen.** *Research on Calculation Method of Ion Flow Field under Multi-circuit HVDC Transmission Lines.* Proceedings, 20th Int. Zurich Symposium on EMC, Zurich 2009.

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4783408&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4776128%2F4783361%2F04783408.pdf%3Farnumber%3D4783408>

[9] **U. Straumann, C. M. Franck.** *Finite Element Simulation of Ion Currents from Coronating HVDC Overhead Lines.* High Voltage Laboratory, ETH Zurich, Physikstrasse 3, 8092 Zürich, Suiza.

[http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx\\_ethpublications/ISH2011\\_Straumann\\_15teMai11.pdf](http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/ISH2011_Straumann_15teMai11.pdf)

[10] **Minhua Ma, Yuming Zhao, Zhicheng Guan, Liming Wang.** *The Influence of Contaminations on HVDC Conductor Corona Characteristics.* 2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4451584&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F44446724%2F4451451%2F04451584.pdf%3Farnumber%3D4451584>

[11] **Organización Mundial de la Salud (OMS).** *Campos electromagnéticos y salud pública - Campos eléctricos y magnéticos estáticos.* Nota descriptiva N°299. Marzo de 2006.

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs299/es/index.html>

[12] **IEEE Standards Coordinating Committee 28. IEEE International Committee on Electromagnetic Safety on Non-Ionizing Radiation.** *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0–3 kHz – Standar C95.6.* Marzo de 2002.

<http://standards.ieee.org/findstds/standard/C95.6-2002.html>

[13] **Grupo de Tecnología Electrónica de la Universidad de Sevilla. Francisco José Rodríguez Ramiro.** *Comparativa convertidores HVDC-VSC, Capítulo 6: Configuraciones De Un Sistema HVDC.*

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/40062/fichero/CAPITULOS%252F6.-+CONFIGURACIONES+DE+UN+SISTEMA+HVDC.pdf>

[14] **Universidad de Málaga.** *Transporte de Energía Eléctrica en Corriente Continua HVDC.*

[http://www.uma.es/investigadores/grupos/electronica\\_potencia/documents/documentos/tema8\\_transoprt\\_elec\\_cc\\_HVDC.pdf](http://www.uma.es/investigadores/grupos/electronica_potencia/documents/documentos/tema8_transoprt_elec_cc_HVDC.pdf)

[15] **Héctor Miranda Campos.** *Determinación de los efectos ambientales generados por la operación de una línea aérea en HVDC.* Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Electricista. Universidad de Chile, 2008.

## 7. Anexos

### ANEXO A: Código de la función “main”.

```
8. function E=main()
9.
10. %considera temperatura ambiente 25°C y presión atmosférica 760mmHg y
11. %conductor nuevo
12.
13. clc;
14. display('Estimación de Campos Eléctricos y Magnéticos para una línea de transmisión en
HVDC');
15. display('Por favor ingrese los parámetros de la línea que se le solicitan a
continuación');
16. fprintf('\n');
17. Vn=input('Ingrese el Voltaje de la línea en [V]: ');
18. Corriente=input('Ingrese la corriente nominal por circuito [A]: ');
19. RadioCond=input('Ingrese el radio de los conductores m: ');
20. RadioGeo=input('Ingrese la máxima separación de los conductores en el arreglo m: ');
21. a=input('Ingrese la separación entre los arreglos 1 y 2 m: ');
22. b=input('Ingrese la separación entre los arreglos de conductores 3 y 4 m: ');
23. c=input('Ingrese la diferencia de altura entre los arreglos 1 y 2 con 3 y 4 m: ');
24. z0=input('Ingrese la altura del primer arreglo de conductores m: ');
25. epsilon=8.85e-12; %esto es en F/m, asique asumo que es en el sistema internacional
26. mu=4*pi*10^(-7);
27.
28. y0=0-a/2;
29.
30. Z0=1:4;
31. Y0=1:4;
32. Z0(1)=z0;
33. Z0(2)=z0;
34. Z0(3)=z0-c;
35. Z0(4)=z0-c;
36.
37. Y0(1)=y0;
38. Y0(2)=y0+a;
39. Y0(3)=y0-(b-a)/2;
40. Y0(4)=y0+(a+b)/2;
41.
42. Req=RadioGeo*((4*RadioCond)/RadioGeo)^(1/4);
43.
44. E0=zeros(4,2);
45. Eon=gradiente(0.342,1,0,25);
46. magnetico=zeros(200,200);
47.
48. fprintf('\n');
49. display('Por favor, espere. El proceso puede tomar varios minutos');
50.
51. V0=1:4;
52.
53. for tipoConexion=1:4;
54.
55.     if(tipoConexion==1)
56.         V0(1)=Vn;
57.         V0(2)=-Vn;
58.         V0(3)=-Vn;
59.         V0(4)=Vn;
60.
61.     elseif(tipoConexion==2)
62.         V0(1)=-Vn;
63.         V0(2)=Vn;
64.         V0(3)=-Vn;
65.         V0(4)=Vn;
66.
67.     elseif(tipoConexion==3)
68.         V0(1)=Vn;
69.         V0(2)=Vn;
```

```

70.         V0(3)=-Vn;
71.         V0(4)=-Vn;
72.
73.     elseif(tipoConexion==4)
74.         V0(1)=-Vn;
75.         V0(2)=-Vn;
76.         V0(3)=Vn;
77.         V0(4)=Vn;
78.     end
79.
80.     for i=1:4
81.         E0(i,:)=E_space_charge_free(z0,y0,tipoConexion,Vn,RadioCond,RadioGeo,a,b,c,(Z0(i)-
Req),Y0(i));
82.     end
83.
84.     An0=1:4;
85.
86.     for i=1:4
87.         auxiliar=absoluto(E0(i,:));
88.         An0(i)=An(Eon,auxiliar);
89.     end
90.
91.     campos=zeros(200,200);
92.     ionizado=zeros(200,200);
93.     rho=zeros(200,200);
94.     A=0;
95.
96.     for i=-50:0.5:49 %i=y, j=z
97.         for j=0:0.5:99
98.             posy=sqrt(((i+50)/0.5)+1)^2); %coordenadas de la matriz
99.             posz=sqrt((abs(j/0.5)+1)^2);
100.
M=E_space_charge_free(z0,y0,tipoConexion,Vn,RadioCond,RadioGeo,a,b,c,j,i);
101.             campos(round(posy),round(posz))=absoluto(M);
102.             distancias=1:4;
103.             for k=1:4 %calculo la distancia del punto a los distintos conductore
104.                 distancias(k)=calcularDistancia(Y0(k),i,Z0(k),j);
105.             end
106.             for k=1:4 %aca busco al conductor mas cercano y selecciono el An
correspondiente
107.                 if (distancias(k)==min(distancias))
108.                     A=An0(k);
109.                     Econd=absoluto(E0(k,:));
110.                     marcador=k;
111.                 end
112.             end
113.
114.             alfa=-A*epsilon*Econd.^2;
115.             A3=(epsilon*campos(round(posy),round(posz))^2)/alfa;
116.             cte=V0(k)+(epsilon*campos(round(posy),round(posz))^2*A^2)/2;
117.
118.             %calculando la densidad de carga espacial
119.             if (V0(marcador)<0)
120.                 A2=-sqrt((2*(abs(cte-
voltaje(i,Y0(k),j,Z0(k),Req,Vn,tipoConexion,marcador)))/(epsilon*campos(round(posy),round(
posz))^2)));
121.             else
122.                 A2=sqrt((2*(cte-
voltaje(i,Y0(k),j,Z0(k),Req,Vn,tipoConexion,marcador)))/(epsilon*campos(round(posy),round(
posz))^2)));
123.             end
124.             rho(round(posy),round(posz))=1/A2;
125.
126.             ionizado(round(posy),round(posz))=campos(round(posy),round(posz))*A3;
127.
128.         end
129.     end
130.
131.     %Densidad de carga a 1 metro del suelo
132.     if (tipoConexion==1)
133.         rho1=abs(rho(:,3));
134.     elseif (tipoConexion==2)
135.         rho2=abs(rho(:,3));

```

```

136.         elseif (tipoConexion==3)
137.             rho3=abs(rho(:,3));
138.         elseif (tipoConexion==4)
139.             rho4=abs(rho(:,3));
140.         end
141.
142.         %Al medio de la línea de transmisión,
143.         if (tipoConexion==1)
144.             rho11=abs(rho(:,round(z0-c/2)));
145.         elseif (tipoConexion==2)
146.             rho21=abs(rho(:,round(z0-c/2)));
147.         elseif (tipoConexion==3)
148.             rho31=abs(rho(:,round(z0-c/2)));
149.         elseif (tipoConexion==4)
150.             rho41=abs(rho(:,round(z0-c/2)));
151.         end
152.
153.         %a 40 metros del suelo
154.         if (tipoConexion==1)
155.             rho401=abs(rho(:,80));
156.         elseif (tipoConexion==2)
157.             rho402=abs(rho(:,80));
158.         elseif (tipoConexion==3)
159.             rho403=abs(rho(:,80));
160.         elseif (tipoConexion==4)
161.             rho404=abs(rho(:,80));
162.         end
163.
164.         %a 100 metros del suelo
165.         if (tipoConexion==1)
166.             rho1001=abs(rho(:,199));
167.         elseif (tipoConexion==2)
168.             rho1002=abs(rho(:,199));
169.         elseif (tipoConexion==3)
170.             rho1003=abs(rho(:,199));
171.         elseif (tipoConexion==4)
172.             rho1004=abs(rho(:,199));
173.         end
174.
175.         xlsxwrite('Campos Eléctricos para los distintos tipos de
conexión',ionizado,tipoConexion);
176.
177.         clc;
178.         display('Procesado con éxito');
179.
180.         PerdidasCorona=perdidasCorona(Eon,2*RadioCond,4,17,15)
181.
182.         display('Por favor, espere mientras se grafica el resultado. Esto puede tomar
unos minutos');
183.
184.         %aca se almacenan las variables para su posterior graficacion
185.         %Magnitud del campo electrico a 1 metro del suelo
186.         if (tipoConexion==1)
187.             campo1=abs(ionizado(:,3));
188.         elseif (tipoConexion==2)
189.             campo2=abs(ionizado(:,3));
190.         elseif (tipoConexion==3)
191.             campo3=abs(ionizado(:,3));
192.         elseif (tipoConexion==4)
193.             campo4=abs(ionizado(:,3));
194.         end
195.
196.         %Al medio de la línea de transmisión,
197.         if (tipoConexion==1)
198.             campo11=abs(ionizado(:,round(z0-c/2)));
199.         elseif (tipoConexion==2)
200.             campo21=abs(ionizado(:,round(z0-c/2)));
201.         elseif (tipoConexion==3)
202.             campo31=abs(ionizado(:,round(z0-c/2)));
203.         elseif (tipoConexion==4)
204.             campo41=abs(ionizado(:,round(z0-c/2)));
205.         end
206.

```

```

207.     %a 40 metros del suelo
208.     if (tipoConexion==1)
209.         campo401=abs(ionizado(:,80));
210.     elseif (tipoConexion==2)
211.         campo402=abs(ionizado(:,80));
212.     elseif (tipoConexion==3)
213.         campo403=abs(ionizado(:,80));
214.     elseif (tipoConexion==4)
215.         campo404=abs(ionizado(:,80));
216.     end
217.
218.     %a 100 metros del suelo
219.     if (tipoConexion==1)
220.         campo1001=abs(ionizado(:,199));
221.     elseif (tipoConexion==2)
222.         campo1002=abs(ionizado(:,199));
223.     elseif (tipoConexion==3)
224.         campo1003=abs(ionizado(:,199));
225.     elseif (tipoConexion==4)
226.         campo1004=abs(ionizado(:,199));
227.     end
228.
229.     %Acá se calcula y grafica el Campo Eléctrico Ionizado
230.     subplot(2,2,tipoConexion);
231.     for i=1:199
232.         for j=1:199
233.             posy=(i-1)*0.5-50;
234.             posz=(j-1)*0.5;
235.             vectory=[posy posy+0.5 posy+0.5 posy];
236.             vectorz=[posz posz posz+0.5 posz+0.5];
237.
238.             promedio=(ionizado(i,j)+ionizado(i,j+1)+ionizado(i+1,j)+ionizado(i+1,j+1))/4;
239.
240.             if(0<abs(promedio)&&abs(promedio)<0.1e004)
241.                 patch(vectory,vectorz,'blue');
242.                 set(patch(vectory,vectorz,'blue'),'EdgeColor','blue');
243.             elseif(0.1e004<=abs(promedio)&&abs(promedio)<0.25e004)
244.                 patch(vectory,vectorz,'cyan');
245.                 set(patch(vectory,vectorz,'cyan'),'EdgeColor','cyan');
246.             elseif(0.25e004<=abs(promedio)&&abs(promedio)<0.35e004)
247.                 patch(vectory,vectorz,'green');
248.                 set(patch(vectory,vectorz,'green'),'EdgeColor','green');
249.             elseif(0.35e004<=abs(promedio)&&abs(promedio)<0.5e004)
250.                 patch(vectory,vectorz,'yellow');
251.                 set(patch(vectory,vectorz,'yellow'),'EdgeColor','yellow');
252.             elseif(0.5e004<=abs(promedio)&&abs(promedio)<0.7e004)
253.                 patch(vectory,vectorz,'magenta');
254.                 set(patch(vectory,vectorz,'magenta'),'EdgeColor','magenta');
255.             elseif(0.7e004<=abs(promedio))
256.                 patch(vectory,vectorz,'red');
257.                 set(patch(vectory,vectorz,'red'),'EdgeColor','red');
258.             end
259.         end
260.     end
261.
262.     if (tipoConexion==1)
263.         title('Campo Eléctrico ionizado para el tipo de Conexión 1');
264.     elseif (tipoConexion==2)
265.         title('Campo Eléctrico ionizado para el tipo de Conexión 2');
266.     elseif (tipoConexion==3)
267.         title('Campo Eléctrico ionizado para el tipo de Conexión 3');
268.     elseif (tipoConexion==4)
269.         title('Campo Eléctrico ionizado para el tipo de Conexión 4');
270.     end
271.
272.
273.
274. end
275.
276. saveas(gcf,'Campo Ionizado para los distintos arreglos de conductores','png');
277. close(gcf);
278.

```

```

279. %dibujando la densidad de carga espacial
280. for tipoConexion=1:4
281.     subplot(2,2,tipoConexion);
282.     for i=1:199
283.         for j=1:199
284.             posy=(i-1)*0.5-50;
285.             posz=(j-1)*0.5;
286.             vectory=[posy posy+0.5 posy+0.5 posy];
287.             vectorz=[posz posz posz+0.5 posz+0.5];
288.             promedio=(rho(i,j)+rho(i,j+1)+rho(i+1,j)+rho(i+1,j+1))/4;
289.             if(promedio<-0.35e-003)
290.                 patch(vectory,vectorz,'blue');
291.                 set(patch(vectory,vectorz,'blue'),'EdgeColor','blue');
292.             elseif(-0.35e-003<=promedio&&promedio<-0.15e-003)
293.                 patch(vectory,vectorz,'cyan');
294.                 set(patch(vectory,vectorz,'cyan'),'EdgeColor','cyan');
295.             elseif(-0.15e-003<=promedio&&promedio<0)
296.                 patch(vectory,vectorz,'green');
297.                 set(patch(vectory,vectorz,'green'),'EdgeColor','green');
298.
299.             elseif(0<=abs(promedio)&&abs(promedio)<0.15e-003)
300.                 patch(vectory,vectorz,'yellow');
301.                 set(patch(vectory,vectorz,'yellow'),'EdgeColor','yellow');
302.             elseif(0.15e-003<=abs(promedio)&&abs(promedio)<0.35e-003)
303.                 patch(vectory,vectorz,'magenta');
304.                 set(patch(vectory,vectorz,'magenta'),'EdgeColor','magenta');
305.             elseif(0.35e-003<=abs(promedio))
306.                 patch(vectory,vectorz,'red');
307.                 set(patch(vectory,vectorz,'red'),'EdgeColor','red');
308.             end
309.         end
310.     end
311.
312.     if (tipoConexion==1)
313.         title('Densidad de carga espacial para Conexión tipo 1');
314.     elseif (tipoConexion==2)
315.         title('Densidad de carga espacial para Conexión tipo 2');
316.     elseif (tipoConexion==3)
317.         title('Densidad de carga espacial para Conexión tipo 3');
318.     elseif (tipoConexion==4)
319.         title('Densidad de carga espacial para Conexión tipo 4');
320.     end
321. end
322.
323. %Se termina de calcular y dibujar la densidad de carga espacial
324.
325. saveas(gcf,'Densidades de carga para los distintos arreglos de conductores','png');
326. close(gcf);
327. xlswrite('Densidad espacial de carga',rho,tipoConexion); %exportando las densidades
a un .xls
328.
329. %calculo el campo magnetico
330.
331. %buscando el conductor más cercano
332.
333. for i=1:199
334.     for j=1:199
335.         distancias=1:4;
336.         posy=(i-1)*0.5-50;
337.         posz=(j-1)*0.5;
338.         for k=1:4 %calculo la distancia del punto a los distintos conductore
339.             distancias(k)=calcularDistancia(Y0(k),posy,Z0(k),posz);
340.         end
341.         for k=1:4 %aca busco al conductor mas cercano
342.             if (distancias(k)==min(distancias))
343.                 marcador=k;
344.                 break;
345.             end
346.         end
347.
348.         magnetico(i,j)=(Corriente*mu)/(2*pi*distancias(marcador));
349.     end
350. end

```



```

351.
352.     %finalmente, el campo magnetico, que es uno solo, independiente de
353.     %tipoConexion
354.     for i=1:199
355.         for j=1:199
356.             posy=(i-1)*0.5-50;
357.             posz=(j-1)*0.5;
358.             vectory=[posy posy+0.5 posy+0.5 posy];
359.             vectorz=[posz posz posz+0.5 posz+0.5];
360.
361.             promedio=(magnetico(i,j)+magnetico(i,j+1)+magnetico(i+1,j)+magnetico(i+1,j+1))/4;
362.             if(0<abs(promedio)&&abs(promedio)<0.1e-002)
363.                 patch(vectory,vectorz,'blue');
364.                 set(patch(vectory,vectorz,'blue'),'EdgeColor','blue');
365.             elseif(0.1e-002<=abs(promedio)&&abs(promedio)<0.25e-002)
366.                 patch(vectory,vectorz,'cyan');
367.                 set(patch(vectory,vectorz,'cyan'),'EdgeColor','cyan');
368.             elseif(0.25e-002<=abs(promedio)&&abs(promedio)<0.35e-002)
369.                 patch(vectory,vectorz,'green');
370.                 set(patch(vectory,vectorz,'green'),'EdgeColor','green');
371.             elseif(0.35e-002<=abs(promedio)&&abs(promedio)<0.5e-002)
372.                 patch(vectory,vectorz,'yellow');
373.                 set(patch(vectory,vectorz,'yellow'),'EdgeColor','yellow');
374.             elseif(0.5e-002<=abs(promedio)&&abs(promedio)<0.7e-002)
375.                 patch(vectory,vectorz,'magenta');
376.                 set(patch(vectory,vectorz,'magenta'),'EdgeColor','magenta');
377.             elseif(0.7e-002<=abs(promedio))
378.                 patch(vectory,vectorz,'red');
379.                 set(patch(vectory,vectorz,'red'),'EdgeColor','red');
380.             end
381.         end
382.     end
383.
384.     etiqueta=-50:0.5:49.5; %Escala del eje 'x' de los graficos
385.     xlswrite('Campo Magnético',magnetico); %exporto los valores del campo magnetico a
386.     una planilla de calculo
387.     title('Perfil de Campo Magnético');
388.     saveas(gcf,'Perfil de Campo Magnético','png');
389.     close(gcf);
390.
391.     subplot(2,2,1);
392.     plot(etiqueta,magnetico(:,3));
393.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
394.     ylabel('Intensidad de B [T]');
395.     title('A 1 metro del suelo');
396.
397.     subplot(2,2,2);
398.     plot(etiqueta,magnetico(:,round(z0-c/2)));
399.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
400.     ylabel('Intensidad de B [T]');
401.     title('Al centro de la línea');
402.
403.     subplot(2,2,3);
404.     plot(etiqueta,magnetico(:,80));
405.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
406.     ylabel('Intensidad de B [T]');
407.     title('A 40 metros del suelo');
408.
409.     subplot(2,2,4);
410.     plot(etiqueta,magnetico(:,199));
411.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
412.     ylabel('Intensidad de B [T]');
413.     title('A 100 metros del suelo');
414.
415.     saveas(gcf,'Perfiles de Campo Magnético a distitas alturas','png');
416.     close(gcf);
417.
418.     %Gráfico del campo electrico a 1 metro del suelo
419.     subplot(2,2,1);
420.     title('Magnitudes del Campo Eléctrico Ionizado a 1 metro de altura');
421.     plot(etiqueta,campol);

```

```

422. xlabel('Distancia al centro de la línea');
423. ylabel('Intensidad de E [V/m]');
424. title('Conexión tipo 1');
425.
426. subplot(2,2,2);
427. plot(etiqueta,campo2);
428. xlabel('Distancia al centro de la línea');
429. ylabel('Intensidad de E [V/m]');
430. title('Conexión tipo 2');
431.
432. subplot(2,2,3);
433. plot(etiqueta,campo3);
434. xlabel('Distancia al centro de la línea');
435. ylabel('Intensidad de E [V/m]');
436. title('Conexión tipo 3');
437.
438. subplot(2,2,4);
439. plot(etiqueta,campo4);
440. xlabel('Distancia al centro de la línea');
441. ylabel('Intensidad de E [V/m]');
442. title('Conexión tipo 4');
443.
444. saveas(gcf,'Campo Eléctrico a 1 metro de altura del suelo','png');
445. close(gcf);
446.
447. %gráfico al medio de la linea de transmision
448. subplot(2,2,1);
449. plot(etiqueta,campo11);
450. xlabel('Distancia al centro de la línea');
451. ylabel('Intensidad de E [V/m]');
452. title('Conexión tipo 1');
453.
454. subplot(2,2,2);
455. plot(etiqueta,campo21);
456. xlabel('Distancia al centro de la línea');
457. ylabel('Intensidad de E [V/m]');
458. title('Conexión tipo 2');
459.
460. subplot(2,2,3);
461. plot(etiqueta,campo31);
462. xlabel('Distancia al centro de la línea');
463. ylabel('Intensidad de E [V/m]');
464. title('Conexión tipo 3');
465.
466. subplot(2,2,4);
467. plot(etiqueta,campo41);
468. xlabel('Distancia al centro de la línea');
469. ylabel('Intensidad de E [V/m]');
470. title('Conexión tipo 4');
471.
472. saveas(gcf,'Campo Eléctrico al medio de la linea de transmision','png');
473. close(gcf);
474.
475. %A 40 metros del suelo
476. subplot(2,2,1);
477. plot(etiqueta,campo401);
478. xlabel('Distancia al centro de la línea');
479. ylabel('Intensidad de E [V/m]');
480. title('Conexión tipo 1');
481.
482. subplot(2,2,2);
483. plot(etiqueta,campo402);
484. xlabel('Distancia al centro de la línea');
485. ylabel('Intensidad de E [V/m]');
486. title('Conexión tipo 2');
487.
488. subplot(2,2,3);
489. plot(etiqueta,campo403);
490. xlabel('Distancia al centro de la línea');
491. ylabel('Intensidad de E [V/m]');
492. title('Conexión tipo 3');
493.
494. subplot(2,2,4);

```

```

495.     plot(etiqueta,campo404);
496.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
497.     ylabel('Intensidad de E [V/m]');
498.     title('Conexión tipo 4');
499.
500.     saveas(gcf,'Campo Eléctrico a 40 metros de altura del suelo','png');
501.     close(gcf);
502.
503.     %A 100 metros del suelo
504.     subplot(2,2,1);
505.     plot(etiqueta,campo1001);
506.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
507.     ylabel('Intensidad de E [V/m]');
508.     title('Conexión tipo 1');
509.
510.     subplot(2,2,2);
511.     plot(etiqueta,campo1002);
512.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
513.     ylabel('Intensidad de E [V/m]');
514.     title('Conexión tipo 2');
515.
516.     subplot(2,2,3);
517.     plot(etiqueta,campo1003);
518.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
519.     ylabel('Intensidad de E [V/m]');
520.     title('Conexión tipo 3');
521.
522.     subplot(2,2,4);
523.     plot(etiqueta,campo1004);
524.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
525.     ylabel('Intensidad de E [V/m]');
526.     title('Conexión tipo 4');
527.
528.     saveas(gcf,'Campo Eléctrico a 100 metros de altura del suelo','png');
529.     close(gcf);
530.
531.
532.     %Graficos de rho
533.     subplot(2,2,1);
534.     title('Densidad de carga a 1 metro de altura');
535.     plot(etiqueta,rho1);
536.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
537.     ylabel('Densidad de carga');
538.     title('Conexión tipo 1');
539.
540.     subplot(2,2,2);
541.     plot(etiqueta,rho2);
542.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
543.     ylabel('Densidad de carga');
544.     title('Conexión tipo 2');
545.
546.     subplot(2,2,3);
547.     plot(etiqueta,rho3);
548.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
549.     ylabel('Densidad de carga');
550.     title('Conexión tipo 3');
551.
552.     subplot(2,2,4);
553.     plot(etiqueta,rho4);
554.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
555.     ylabel('Densidad de carga');
556.     title('Conexión tipo 4');
557.
558.     saveas(gcf,'Densidad de carga a 1 metro de altura del suelo','png');
559.     close(gcf);
560.
561.     %gráfico al medio de la linea de transmision
562.     subplot(2,2,1);
563.     plot(etiqueta,rho11);
564.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
565.     ylabel('Densidad de carga');
566.     title('Conexión tipo 1');
567.

```

```

568.     subplot(2,2,2);
569.     plot(etiqueta,rho21);
570.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
571.     ylabel('Densidad de carga');
572.     title('Conexión tipo 2');
573.
574.     subplot(2,2,3);
575.     plot(etiqueta,rho31);
576.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
577.     ylabel('Densidad de carga');
578.     title('Conexión tipo 3');
579.
580.     subplot(2,2,4);
581.     plot(etiqueta,rho41);
582.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
583.     ylabel('Densidad de carga');
584.     title('Conexión tipo 4');
585.
586.     saveas(gcf,'Densidad de carga al medio de la linea de transmision','png');
587.     close(gcf);
588.
589.     %A 40 metros del suelo
590.     subplot(2,2,1);
591.     plot(etiqueta,rho401);
592.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
593.     ylabel('Densidad de carga');
594.     title('Conexión tipo 1');
595.
596.     subplot(2,2,2);
597.     plot(etiqueta,rho402);
598.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
599.     ylabel('Densidad de carga');
600.     title('Conexión tipo 2');
601.
602.     subplot(2,2,3);
603.     plot(etiqueta,rho403);
604.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
605.     ylabel('Densidad de carga');
606.     title('Conexión tipo 3');
607.
608.     subplot(2,2,4);
609.     plot(etiqueta,rho404);
610.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
611.     ylabel('Densidad de carga');
612.     title('Conexión tipo 4');
613.
614.     saveas(gcf,'Densidad de carga a 40 metros de altura del suelo','png');
615.     close(gcf);
616.
617.     %A 100 metros del suelo
618.     subplot(2,2,1);
619.     plot(etiqueta,rho1001);
620.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
621.     ylabel('Densidad de carga');
622.     title('Conexión tipo 1');
623.
624.     subplot(2,2,2);
625.     plot(etiqueta,rho1002);
626.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
627.     ylabel('Densidad de carga');
628.     title('Conexión tipo 2');
629.
630.     subplot(2,2,3);
631.     plot(etiqueta,rho1003);
632.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
633.     ylabel('Densidad de carga');
634.     title('Conexión tipo 3');
635.
636.     subplot(2,2,4);
637.     plot(etiqueta,rho1004);
638.     xlabel('Distancia al centro de la línea');
639.     ylabel('Densidad de carga');
640.     title('Conexión tipo 4');

```

```
641.
642.     saveas(gcf, 'Densidad de carga a 100 metros de altura del suelo', 'png');
643.     close(gcf);
644.
645.     [y, Fs]=wavread('sonido');
646.     sound(y, Fs);
647.
648.     end
```