

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA, INFORMATICA
Y MECANICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA ELECTRICA



TESIS

**INCIDENCIA DEL EFECTO CORONA EN LA
RADIOINTERFERENCIA ELECTROMAGNETICA EN LÍNEAS DE
TRANSMISIÓN DE ALTA TENSION EN C.A.**

Tesis presentada por:

Br. RAUL BACA CANO

Br. DANIEL GUSTAVO CARDENAS DE LA VEGA,

Para Optar al Título Profesional de Ingeniero Electricista

ASESOR: M.Sc. Ing° VICTORIO TAPIA RIVAS.

**CUSCO-PERU
2019**

PRESENTACION

Señor:

Decano de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Informática y
Mecánica

En cumplimiento con las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos vigentes, con la finalidad de optar el título de ingeniero Electricista, presentamos a vuestra consideración la tesis intitulada:

“INCIDENCIA DEL EFECTO CORONA EN LA RADIOINTERFERENCIA ELECTROMAGNÈTICA EN LÌNEAS DE TRANSMISIÒN DE ALTA TENSION EN C.A.”.

Br. Raul Baca Cano

Br. Daniel Gustavo Cárdenas de la Vega

DEDICATORIA

A Dios, quien me fortalece el camino
a seguir

A mi madre Clotilde quien es el que
me brindó todo su amor y compañía

A mi padre Arístides por su fortaleza

A mis hijos Manuel y Brian quienes
son mi fuente de inspiración.

Raul

Con todo mi amor y cariño a mi madre
Zarina, por todo el cariño y apoyo
permanente

A mi familia, quienes me brindaron su
apoyo incondicional en las diferentes
etapas de mi vida.

Gracias a todos ellos.

Daniel Gustavo

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la “Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco” por cobijarnos en sus aulas universitarias y por darnos la oportunidad de formarnos tanto profesionalmente y como personas.

A nuestros docentes de la UNSAAC, quienes nos brindaron parte de sus conocimientos, por los valores inculcados en el trajinar de los años y por sembrar actitud, aptitud y espíritu emprendedor, que ahora son parte de nuestras raíces.

A los docentes de la Escuela profesional de Ingeniería eléctrica por participar sembrando conocimiento en nosotros y en especial al Ing. Wilbert Loaiza por el apoyo incondicional

Los tesisistas

INTRODUCCION

Debido a los grandes avances tecnológicos, en la actualidad los empleos de tensiones de transmisión son cada vez más considerables, por lo cual, es frecuente que se presente en las líneas de transmisión un suceso conocido como efecto corona, poseyéndose como resultados principales: Pérdidas de potencia, ruido audible, distorsión en la propagación de ondas, interferencia Electromagnética, descargas luminosas, radiación electromagnética a altas potencias, generación de ozono y viento iónico. La difusión electromagnética ocasionada por el efecto corona se exhiben en un amplio rango de frecuencias y pueden entorpecer con el funcionamiento usual de algunos dispositivos electromagnéticos ubicados en las proximidades de las líneas.

En este estudio se expone el tratamiento de un método para calcular los niveles de radiointerferencia (RI) que ocasionan las líneas de transmisión de alta tensión con efecto corona, el referido método está basado en el método de Gary y la teoría de descomposición modal, contemplándose también el efecto Peculiar en los conductores y el retorno por tierra. El método se lleva a cabo mediante un programa de cómputo y se exhiben casos de uso para líneas trifásicas comparando los resultados con cálculos publicadas anteriormente por otros autores, exponiendo que las mejoras efectuadas al método de Gary canalizan a mejores predicciones de radiointerferencia.

Además, se valoran algunos sistemas simples de atenuación de RI, en especial la variación del número de conductores por fase y del espaciamiento entre los subconductores en haz. Con lo previo se logra ampliar el radio equivalente del haz y seguidamente mitigar los perfiles de radiointerferencia.

Los Autores

RESUMEN

Para una mejor comprensión de lo que se ha pretendido abordar en el presente trabajo este se ha dividido en cinco partes las mismas que guardan estrecha relación entre sí y siguen un orden sistemático para su adecuado estudio.

CAPITULO I. En el primer capítulo se abordan los aspectos relacionados con la concepción en sí del problema que se pretende analizar, precisando con claridad los objetivos a alcanzar, visualizando en forma global los alcances del trabajo así como las limitaciones que se habrán de presentar en el desarrollo del mismo.

CAPITULO II. El segundo capítulo evalúa con énfasis el efecto corona que es causado por la operación de las líneas de transmisión en corriente alterna y que son la causa fundamental de la presencia de radio interferencia, para este efecto se estiman y miden los efectos causados. También se abordan todos los aspectos teóricos relacionados a la interferencia electromagnética, los factores que lo ocasionan y las probables consecuencias que estos traerán en la operación de los sistemas de comunicación de las cercanías.

CAPITULO III. El tercer capítulo describe las características físicas de la línea de transmisión objeto del estudio, identificando todos los parámetros eléctricos cuya presencia interviene en la operación de la línea y que contribuyen a la presencia de la radiointerferencia.

CAPITULO IV. Con la finalidad de predecir el fenómeno de radiointerferencia causado por la presencia del efecto corona de manera sistemática se ha posibilitado la formulación de una metodología para la estimación y/o medición de la radio interferencia mediante el uso de ciertos perfiles tipificados en la casuística presentada.

CAPITULO V. Finalmente como corolario del trabajo se presentan algunas técnicas usualmente empleadas en la atenuación de la radiointerferencia.

ABSTRACT

For a better understanding of what has been attempted to address in this paper, it has been divided into five parts which are closely related to each other and follow a systematic order for proper study.

CHAPTER I. In the first chapter, aspects related to the conception of the problem to be analyzed are addressed, clearly specifying the objectives to be achieved, globally visualizing the scope of work as well as the limitations to be presented in the development of it.

CHAPTER II. The second chapter assesses with emphasis the corona effect that is caused by the operation of the transmission lines in alternating current and that are the fundamental cause of the presence of radio interference, for this effect the effects caused are estimated and measured. It also addresses all theoretical aspects related to electromagnetic interference, the factors that cause it and the likely consequences that these will bring to the operation of nearby communication systems.

CHAPTER III. The third chapter describes the physical characteristics of the transmission line under study, identifying all the electrical parameters whose presence is involved in the operation of the line and that contribute to the presence of radio interference.

CHAPTER IV. In order to predict the phenomenon of radio interference caused by the presence of the corona effect in a systematic way, it has been possible to formulate a methodology for the estimation and / or measurement of radio interference by using certain profiles typified in the case presented.

CHAPTER V. Finally, as a corollary of the work, some techniques usually used in the attenuation of radio interference are presented.

ÍNDICE GENERAL

PRESENTACION	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO	IV
INTRODUCCION.....	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
ÍNDICE DE SIMBOLOGIA	XVII
ÍNDICE DE FOTOS.....	XXI
CAPITULO I.....	1
FORMULACIÓN DE LA TESIS.....	1
1.1 GENERALIDADES:	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	3
1.3 OBJETIVOS.	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	5
1.4 JUSTIFICACIÓN	5
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL TRABAJO.....	6
1.5.1 ALCANCES.	6
1.5.2 LIMITACIONES	6
1.6 METODOLOGIA DE INVESTIGACION.....	7
1.6.1 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	7
1.6.2 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN	7
1.7 BASES TEÓRICAS.....	7
1.8 HIPÓTESIS, VARIABLES E INDICADORES.....	8
1.8.1 HIPOTESIS.	8
1.8.2 HIPOTESIS ESPECÍFICAS.....	8

1.9	VARIABLES	8
1.9.1	VARIABLES DEPENDIENTES.	8
1.9.2	VARIABLES INDEPENDIENTES.	8
1.9.3	VARIABLES INTERVINIENTES	8
1.9.4	INDICADORES	9
	CAPITULO II.....	10
	MARCO TEORICO	10
2.1	INTRODUCCION	10
2.2	PROCESO BÁSICO DE IONIZACIÓN.	11
2.3	MEDICIÓN DE LA CORRIENTE CORONA.....	13
2.4	GRADIENTE DE INCEPCIÓN DE CORONA.....	15
2.4.1	MÉTODO DE CÁLCULO DEL GRADIENTE SUPERFICIAL PARA UN HAZ DE CONDUCTORES	17
2.5	OTROS FENÓMENOS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE LA CORONA.....	20
2.5.1	GOTAS DE AGUA	20
2.5.2	DISCONTINUIDAD SUPERFICIAL.....	20
2.5.3	DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE.....	21
2.5.4	HUMEDAD	22
2.6	PÉRDIDAS POR CORONA	22
2.6.1	MÉTODOS DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR CORONA	23
2.7	RUIDO AUDIBLE	33
2.7.1	CALCULO DE RUIDO AUDIBLE	34
2.8	RADIOINTERFERENCIA.....	35
2.9	DISTORSIÓN EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS.....	35
2.9.1	REPRESENTACION DE CORONA PARA EL ANALISIS DE PROPAGACION DE ONDAS.....	36
2.10	GENERACION DE OZONO	38
2.11	VIENTO IONICO.....	38
2.12	RADIOINTERFERENCIA POR CORONA EN LINEAS DE TRANSMISION.....	39
2.13	DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA RI DEBIDA AL EFECTO CORONA.....	40

2.14	EL CONCEPTO DE FUNCIÓN DE EXCITACIÓN.....	42
2.15	ESTIMACIÓN DE LA RI.	45
2.15.1	CONDICIONES CLIMATICAS	45
2.15.2	ESPECTRO DE FRECUENCIAS	46
2.15.3	GEOMETRÍA DEL CONDUCTOR	46
2.15.4	PERFIL LATERAL DE LA RADIOINTERFERENCIA (RI).....	47
2.16	MEDICIÓN DE LA RI.	47
2.16.1	EL MEDIDOR DE RADIOINTERFERENCIA.....	47
2.16.2	SISTEMAS DE ANTENA	49
2.17	INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA EN CORRIENTE DIRECTA.	50
2.18	EFFECTO SKIN	50
	CAPITULO III.....	51
	IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS ELECTRICOS DEL TRAMO	
	QUENCORO-TINTAYA	51
3.1	GENERALIDADES	51
3.2	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL SISTEMA	51
3.3	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA LÍNEA	52
3.4	CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPAMIENTO	55
3.4.1	ESTRUCTURAS METÁLICAS.....	55
3.4.2	CONDUCTORES.....	58
3.4.3	CABLE DE GUARDA.....	58
3.4.4	AISLADORES.....	58
3.4.5	PUESTA A TIERRA.....	59
3.4.6	PARARRAYOS.....	60
3.4.7	SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	60
3.5	CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS.....	60
3.5.1	RESISTENCIA ELECTRICA.....	60
3.5.2	REACTANCIA INDUCTIVA	61
3.5.3	IMPEDANCIA SERIE UNITARIA	62
3.4.4	IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO.....	62

3.5.5 IMPEDANCIA PARALELA UNITARIA	63
3.5.6 IMPEDANCIA CARACTERISTICA	63
3.5.7 POTENCIA NATURAL.....	64
3.6 PERDIDAS POR CORONA.....	64
3.7 DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE	65
CAPÍTULO IV	66
MÉTODO DE PREDICCIÓN DE PERFILES DE RADIOINTERFERENCIA	66
4.1 INTRODUCCION	66
4.2 ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE CORONA Y CÁLCULO DE RI.	66
4.2.1 LINEA MONOFASICA	66
4.2.2 LINEA MULTICONDUCTORA	69
4.3 CASOS DE PRUEBA.....	76
4.3.1 LINEAS EN CONFIGURACION HORIZONTAL Y TRIANGULAR	77
4.3.2 LINEAS EN CONFIGURACION VERTICAL	84
4.4 COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES.	86
4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	88
CAPITULO V.....	90
EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE ATENUACIÓN DE RI	90
5.1 INTRODUCCIÓN	90
5.2 SELECCIÓN DE CONDUCTORES.....	90
5.3 CONDUCTORES EN HAZ.....	92
5.4 CALCULO DE CONDUCTORES CON RESPECTO AL ESFUERZO CAUSADO POR LA ALTA TENSIÓN.....	94
5.4.1 DISEÑO CON RESPECTO A LOS PARAMETROS ELECTRICOS.....	94
5.4.2 DISEÑO CON RESPECTO AL GRADIENTE EN LA SUPERFICIE DE LOS CONDUCTORES Y EFECTO CORONA	96
5.5 DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LA SUPERFICIE DE LOS CONDUCTORES	96
5.6 APLICACIÓN DE CRITERIOS PARA LA ATENUACIÓN DE NIVELES DE RI.....	107

5.6.1 VARIACION EN EL ESPACIAMIENTO ENTRE SUBCONDUCTORES	107
5.6.2 VARIACION EN EL NUMERO DE SUBCONDUCTORES	110
5.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS	113
CONCLUSIONES.....	115
RECOMENDACIONES	117
BIBLIOGRAFÍA	118
ANEXOS	120
MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. Conductor con efecto corona.	10
FIGURA 2.2. Avalancha de electrones de un electrodo negativo.	13
FIGURA 2.3. Arreglo experimental para medición corriente corona	14
FIGURA 2.4. Pulso de corriente corona medida en un arreglo coaxial.	15
FIGURA 2.5. Cilindros concéntricos	16
FIGURA 2.6. Conductores paralelos.	17
FIGURA 2.7. Conductor paralelo a un plano.	17
FIGURA 2.8. Distribución geométrica de un haz de conductores	18
FIGURA 2.9. Función de peterson para cálculo de pérdidas por efecto corona con razón (V/ED) entre 0.6 y 2.4.	27
FIGURA 2.10. Función de peterson para cálculo de pérdida por efecto corona con razón (V/ED) entre 1y19	27
FIGURA 2.11. Abaco para pérdidas en conductores secos.	29
FIGURA 2.12. Abaco para determinación de m	30
FIGURA 2.13. Pérdida específica corona	31
FIGURA 2.14. Curvas de referencia	32
FIGURA 2.15. Curva típica de efecto corona para cables en la interperie.	33
FIGURA 2.16. Curva Q – V (carga – voltaje).	36
FIGURA 2.17. Pulsos de corriente de corona positivo y negativo.	42
FIGURA 2.18. Diagrama a bloques de un medidor de radiointerferencia	48
FIGURA 3.1. Torre metálica. 1 cable de guarda.	53
FIGURA 3.2. Estructura tipo S, es una estructura de alineamiento	56
FIGURA 3.3. Estructura de tipo A, es una estructura de anclaje.	57
FIGURA 3.4. Estructura de tipo T, es una estructura de angulo.	57
FIGURA 3.5. Detalle ensamblaje cadena de aisladores clase ansi 52-3.	59
FIGURA 4.1. Circuito por unidad de longitud de una línea aérea con inyecciones de corriente por corona.	67
FIGURA 4.2. Diagrama a bloques del método de predicción de perfiles de RI.	73
FIGURA 4.3. Diagrama a bloques del método de predicción de perfiles de RI (continuación).	74
FIGURA 4.4. Diagrama a bloques del método de predicción de perfiles de RI (continuación).	75

FIGURA 4.5. Diagrama a bloques del método de predicción de perfiles de RI (continuación).....	76
FIGURA 4 6. Características geométricas de la línea trifásica de 380 kV.	78
FIGURA 4 7. Perfil de RI total de la línea trifásica de 380 kV.....	78
FIGURA 4 8. Características geométricas de la línea trifásica de 400 kV.	80
FIGURA 4 9. Perfil de RI total de la línea trifásica de 400 kV.....	80
FIGURA 4 10. Características geométricas de la línea trifásica de 750 KV.....	81
FIGURA 4 11. Perfil de RI total de la línea trifásica de 750 KV.....	82
FIGURA 4 12. Características geométricas de la línea trifásica de 138 kV.....	83
FIGURA 4 13. Perfil de RI total de la línea trifásica de 138 Kv.....	84
FIGURA 4 14. Características geométricas de una línea trifásica de 500 kV.....	85
FIGURA 4 15. Perfil de RI total de la línea trifásica de 500 kV.....	86
FIGURA 5.1. Haz de seis subconductores.	93
FIGURA 5.2. Dimensiones típicas de una torre de suspensión de 138 Kv, circuito doble..	95
FIGURA 5.3. Líneas equipotenciales alrededor de un conductor energizado con 138 Kv..	97
FIGURA 5.4. Introducción de parámetros.....	98
FIGURA 5.5. Introducción del material.....	98
FIGURA 5.6. Aplicación de la malla.....	99
FIGURA 5.7. Intensidad de campo eléctrico en un conductor.....	99
FIGURA 5.8. Distribución del campo eléctrico alrededor de un conductor.....	100
FIGURA 5.9. Líneas equipotenciales alrededor de un haz de 2 conductores energizados con 138 Kv.	101
FIGURA 5.10. Introducción de parámetros.....	101
FIGURA 5.11. Dimensionamiento del modelo.....	102
FIGURA 5.12. Aplicación de la malla.....	102
FIGURA 5.13. Determinación del campo eléctrico.....	103
FIGURA 5.14. Intensidad de campo eléctrico en un haz de 2 conductores.....	103
FIGURA 5.15. Distribución del campo eléctrico alrededor de un haz de 2 conductores...	104
FIGURA 5.16. Líneas equipotenciales alrededor de un haz de 4 conductores energizados con 138 Kv.....	104
FIGURA 5.17. Determinación de propiedades.....	105
FIGURA 5.18. Aplicación de la malla.....	105
FIGURA 5.19. Determinación del campo eléctrico.....	106
FIGURA 5.20. Intensidad de campo eléctrico en un haz de 4 conductores.....	106
FIGURA 5.21. Distribución del campo eléctrico alrededor de un haz de 4 conductores...	107
FIGURA 5.22. Perfil de radiointerferencia de una línea de 400 kv para diferentes espaciamientos entre subconductores.....	108

FIGURA 5.23.Niveles de ri en función del espaciamiento entre subconductores de haz.	109
FIGURA 5.24.Perfil de radiointerferencia de una línea de 400 kv en función del número de subconductores por haz.....	111
FIGURA 5.25.Perfil de RI de una línea de 138 kv en función del número de subconductores por haz.	112
FIGURA 5.26.Perfil de RI de una línea de 500 kv en función del número de subconductores por haz	112

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2 .1.Factores de superficie m.....	21
TABLA2.2.Parametros típicos de los pulsos corona positivo y negativo.....	41
TABLA2.3.Fórmulas empíricas para el cálculo de la función de excitación.....	45
TABLA 3.1.Características generales.....	52
TABLA 3.2.Características específicas.....	52
TABLA 3.3 Características mecánicas del cable de guarda.....	54
TABLA 3.4 Características adicionales.....	54
TABLA 3.5.Características eléctricas de los cables de energía.....	54
TABLA 3.6 Funcion de las torres de las torres metálicas.....	55
TABLA 3.7.Porcentaje de lluvias.....	64
TABLA 3.8.Pérdidas por corona.....	65
TABLA 3.9.Pérdidas por corona en porcentaje.....	65
TABLA 4.1.Constantes de atenuación para el ejemplo 1.....	79
TABLA 4.2.Constantes de atenuación para el ejemplo 2.....	81
TABLA 4.3.Constantes de atenuación para el ejemplo 4.....	84
TABLA 4.4.Constantes de atenuación para el ejemplo 5.....	86
TABLA 4.5.Datos geométricos de las líneas de estudio.....	87
TABLA4.6.Gradientes de campo eléctrico y parámetros utilizados en las mediciones.....	87
TABLA4.7.Comparación entre mediciones y valores calculados de radiointerferencia.....	88
TABLA5.1.Parámetros eléctricos de una línea de transmisión de 138 kv, con diferentes números de subconductores.....	96
TABLA5.2.Comparaciones de niveles de radiointerferencia variando el espaciamiento entre subconductores para diferentes líneas a una distancia de 50.....	110
TABLA5.3.Niveles de RI de una línea de transmisión de 400 kv a 50 m de la fase central, con diferentes números de subconductores.....	110
TABLA5.4.Datos y niveles de RI a 50 m de la fase central, con diferente número de subconductores.....	111

ÍNDICE DE SIMBOLOGIA

α	Constante de atenuación
α_1	Primer coeficiente de ionización de Townsend
α_m	Matriz de constantes de atenuación modal
μ_e	Permeabilidad del terreno
A	Átomo neutro
A^+	Ion positivo
AF	Factor de antena
AIEE	American Institute of Electrical Engineers
AM	Amplitud modulada
ANSI	American National Standards Institute
AT	Alta Tension
BPA	Boneville Power Administration
C	Capacitancia
C	Matriz de capacitancias
CA	Corriente Alterna
C_c	Capacitancia de corona
CD	Corriente Directa
C_g	Capacitancia geométrica
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
CISPR	Comité International Special des Perturbations Radioelectriques
CP	Cuasi-pico
d	Distancia del gap
D_{Li}	Distancia entre conductor y punto de referencia
D_r	Distancia radial
e	Electrón
E	Campo de radiointerferencia

E_o	Rigidez dieléctrica del aire
E_l	Gradiente en la superficie del conductor
E_c	Gradiente critico
EPRI	Electrical Power Research Institute
E_y	Intensidad de campo eléctrico
f	Frecuencia
F	Factor determinado experimentalmente
FM	Frecuencia Modulada
G	Conductancia
g_{avg}	Gradiente eléctrico promedio
g_{max}	Gradiente eléctrico máximo
h	Altura del conductor
HVDC	High Voltage Direct Current
H_x	Campo Magnetico
I	Corriente
I	Vector de corrientes
I_o	Corriente inicial
IEC	International Electrotehcnical Commission
I_m	Vector de corrientes modales
i_p	Amplitud de corriente
IREQ	Hydro-Quebec's Research Institute
n_c	Número de conductores por haz
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
NP	Nivel de ruido audible total
NP_{Ai}	Potencial de ruido audible del conductor
p	Presión del aire
P	Profundidad de penetración
P	Matriz de coeficientes de potencial de Maxwell
p_o	Presion inicial
P_{cor}	Pérdidas por corona
PLC	Power Line Comunication
q	Carga
q	Vector de cargas

r	Radio del conductor
R	Resistencia
R_{eq}	Radio equivalente
RI	Radiointerferencia
R_i	Radio de Haz
RIV	Radio Interference Voltage
s	Separacion entre subconductores
SIL	Surge Impedance Load
t	Temperatura
t_o	Temperatura inicial
TEM	Transversal Electromagnético
TV	Televisión
m	Factor de irregularidad
n	Número de fases
M	Matriz de vectores propios ZY
J	Corriente inducida de corona
J	Vector de corriente corona
J_m	Vector de corrientes corona modales
K	Constante empírica
L	Inductancia
TVI	Transmisión de señales de video
V	Tensión
V	Vector de tensiones
V_c	Tensión de inyección
V_L	Lectura de medición
V_r	Velocidad radial de la carga espacial
x	Distancia del punto de medición
Y	Admitancia en derivación
Y	Matriz de admitancias
Z	Impedancia serie
Z	Matriz de impedancias
Z_o	Impedancia de onda
Z_c	Matriz de impedancias internas de los conductores

Z_G	Matriz de impedancias geométricas
Z_t	Matriz de impedancias debidas al retorno por tierra
β	Constante de fase
Γ	Función de excitación
γ	Constante de propagación
Γ_0	Función de excitación unitaria
δ	Densidad relativa del aire
Δz	Elemento diferencial de longitud
ϵ_0	Permitividad del vacío
λ_l	Matriz de valores propios de YZ
λ_v	Matriz de valores propios de ZY
ρ_e	Resistividad del terreno
φ	Carga generada por corona
Ψ	Matriz de constantes de propagación modal
ψ	Flujo magnético

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1:Medición de la RI con instrumento RIV Meter	144
Foto 2:Foto de la medición de la RI	144
Foto 3:Foto panorámico de la zona	145
Foto 4:Foto que muestra la línea de transmisión 1050	145
Foto 5:Foto de las torres de transmisión y las antenas de comunicación	146

CAPITULO I

FORMULACIÓN DE LA TESIS

1.1 GENERALIDADES:

Después de más de cien años de desarrollo en aspectos técnicos y económicos se cuentan con sistemas eléctricos de potencia convencionales (Que operen dentro de sus límites de capacidad). Debido a que la transmisión de grandes cantidades de potencia a grandes distancias juega un papel muy importante en este avance.

“Si bien la primera línea eléctrica fue tendida por Siemens en Lichterfelde, cerca de Berlín (Alemania) en 1881” (Wolfenson), “la primera transmisión de energía eléctrica a muy larga distancia que merezca este nombre fue construida en los Estados Unidos entre los años 1930 y 1935, entre la central hidroeléctrica Boulder Dam y la ciudad de Los Ángeles, transportando una potencia de 265 kW a una distancia de 430 kilómetros con la frecuencia de 60 Hz y con una tensión de 287 KV, la máxima de la época” (Wunenburger).

“En el año 1913 los niveles de tensión en la transmisión aumentaron a 150 KV y en 1923 a 220 KV. En el año 1936 entró en servicio en EEUU una línea en doble circuito de 287 KV para transmitir 240 MW a una distancia de 428 km, desde la central de Hoover Dam, a través del desierto” (Jacome), desde entonces la tensión de transmisión ha aumentado considerablemente, y en el presente varios países, entre ellos Estados Unidos, Brasil y Venezuela en el continente Americano, cuentan con sistemas de transmisión de energía de corriente alterna de 800 Kv.

El sistema de 400kV y 765kV son considerados dentro de los sistemas de extra alta tensión y son de relativa reciente implantación en 1968 y 1986 respectivamente.

Los sistemas de 1.000 y 1.200 KV de CA han sido ensayados en varias instalaciones de prueba y se han utilizado en aplicaciones comerciales durante breves periodos, pero actualmente no se utilizan comercialmente. “Hay varios problemas relacionados con la construcción de tales líneas y es necesario desarrollar nuevos equipos como

transformadores, interruptores, descargadores de sobretensiones, reactancias en derivación, condensadores en serie, transformadores de corriente y de tensión, así como seccionadores e interruptores de puesta a tierra” (ABB, 2007). “En México, los niveles de tensión utilizados en la red de transmisión son de 400, 230 y 161 KV. Al finalizar marzo del año 2008, esta red alcanzó una longitud de 48, 635 km” (Rico-Melgoza, s.f.).

“En el Perú, la etapa de construcción de las líneas de transmisión de alta tensión empieza en 1938. Antes de esa fecha, la transmisión eléctrica en Lima y en las demás ciudades del país que contaban con suministro eléctrico era muy limitado” (Barrera, 1954).

“Con el ingreso en 1938 de la nueva central Juan Carosio en Callahuanca, generando 36,750 KVA, fue necesario construir una línea de transmisión, la tercera con que contó la ciudad de Lima para su abastecimiento. Es importante señalar que esta fue verdaderamente la primera línea de alta tensión que se construyó en nuestro país, ya que las anteriores eran postes de madera que llevaban solamente una tensión de 33,000 voltios” (Barrera, 1954).

“La línea para esta central, conocida como la línea Barbablanca-Lima, se construyó en dos ternas trifásicas que operaba a la tensión de 60,000 voltios. Estaba constituida con conductores de cobre, suspendidos con cadenas de aisladores sobre 218 torres metálicas de acero colocadas en un recorrido de 52.5 kilómetros desde la central hasta el tablero de distribución de Santa Rosa” (Barrera, 1954).

“En 1951, Empresas Eléctricas Asociadas construyó la central hidroeléctrica de Moyopampa para aumentar su potencia instalada y servir a la ciudad de Lima y el puerto del Callao, que ya bordeaban los 950 mil habitantes. Con el ingreso de esta central, que generaba inicialmente 40,000 kW, fue necesario construir una nueva línea de transmisión de 64 KV con conductores de cobre y acero galvanizado de alta resistencia para el conductor de tierra” (Barrera, 1954).

“La línea fue construida con una longitud total de 39.20 kilómetros, desde una cota inicial a 889 msnm (Moyopampa) hasta los 190 msnm en la cota del punto de llegada, en Santa Rosa. Contaba con torres de doble terna y seis conductores en cable de cobre electrolítico normal, con 19 hilos de 2.86 mm. Se construyeron en total 93 torres piramidales de acero, cada una con un peso aproximado de casi tres toneladas. De éstas, 68 torres se ubicaron en los cerros contiguos al río Rímac y 25 torres en terreno llano. De las 93 torres, 89 fueron suministradas por la Società Anonima Elettificazione (S.A.E.) de Milán y las cuatro torres restantes fueron fabricadas en Alemania por la Gutehoffnungshutte A.G. de Oberhausen” (Barrera, 1954).

En nuestro país desde la década de los 90' la tendencia a utilizar tensiones de transmisión cada vez mayores radica en las considerables ventajas que se obtienen al transportar energía eléctrica a grandes distancias, ya que se logran minimizar las pérdidas y maximizar la potencia transportada. La tendencia a incrementar los niveles de tensión, es motivada principalmente con la intención de aumentar la capacidad de transmisión de la línea y a la vez reducir las pérdidas por unidad de potencia transmitida.

“Aumentar el nivel de tensión de transmisión conlleva a una disminución de la intensidad de corriente que circula por la línea para transportar la misma potencia. Por lo tanto, las pérdidas por calentamiento de los conductores y por efectos electromagnéticos también se reducen. Además, una mayor corriente requiere de conductores de mayor sección transversal, y en consecuencia, con un mayor peso por unidad de longitud. Al utilizar niveles de alta tensión, se pueden utilizar conductores de menor diámetro, y de esta manera reducir el costo de transmisión. Sin duda, la transmisión a alta tensión conlleva una serie de ventajas, pero también es necesario realizar consideraciones en los niveles de aislamiento y dispositivos de protección: por otro lado, se debe tener presente el incremento de fenómenos físicos característicos de la alta tensión como representa el efecto corona” (Siegert, 1988).

“La sociedad actual depende de un conjunto cada vez mayor de sistemas eléctricos, electrónicos y de comunicaciones. Estos sistemas intercambian grandes cantidades de información y energía a través de señales electromagnéticas que contaminan el medio que los rodea” (Siegert, 1988). “Al aumentar número de estos sistemas, también lo hace la complejidad de sus interacciones, en consecuencia, es más probable que los diferentes sistemas se interfieran mutuamente afectando su correcto desempeño” (LaForest, 1981).

“Resulta indispensable que todos estos sistemas funcionen de manera armoniosa, lo cual se puede lograr al reducir las emisiones electromagnéticas no deseadas o al incrementar la inmunidad de los sistemas ante señales que provoquen interferencia” (Maruvada, 2000).

“Mediante los estudios de compatibilidad electromagnética (EMC por sus siglas en inglés) se analiza esta problemática, se buscan soluciones e incluso se genera la normatividad necesaria para regular la interacción entre los sistemas” (F. Kiessling, 2003).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la actualidad, los sistemas de comunicación analógicos, digitales y satelitales

son ampliamente utilizados, y conforme se logran mayores avances en este campo, la transmisión de este tipo de señales se realiza a diferentes frecuencias.

Debido a la utilización de niveles de tensión cada vez mayores en las líneas de transmisión, la probabilidad de que se incremente el efecto corona es muy alta. Dicho fenómeno tiene como consecuencias principales las descritas a continuación: Interferencia en comunicaciones debido a que se presentan oscilaciones electromagnéticas de alta frecuencia en la vecindad de la línea de potencia, que coincidan con la frecuencia de alguna señal de comunicación sobre todo de las líneas telefónicas cercanas a las líneas de transmisión, estas señales van a ser distorsionadas, también se presentan otras consecuencias como las pérdidas de potencia, ruido audible, contaminación ambiental, generación de ozono, viento iónico, distorsión de ondas. Para mitigar este efecto, las líneas de comunicación deben instalarse a distancias seguras de la línea de potencia, razón por la cual es necesario estimar los niveles de radiointerferencia a diferentes distancias de ella.

Si bien es cierto existen instrumentos de medición de radiointerferencia, las herramientas computacionales son de gran utilidad para pronosticar los niveles de ruido electromagnético que generaría una línea aún no instalada. Lo anterior sería de gran provecho para diseñar la línea de tal forma que se tengan los menores perfiles de radiointerferencia posibles. Por tal razón, y con el fin de aumentar la fiabilidad de las herramientas computacionales de los sistemas convencionales, es necesario desarrollar métodos de cálculo cada vez más exactos y que tomen en consideración las características de la línea en particular.

En resumen, podemos decir que: los niveles elevados de las tensiones de transmisión de las líneas cuyos recorridos atraviesan altitudes superiores a los 2500 msnm, y zonas donde haya enrarecimiento del aire o contaminación ambiental, hacen que se manifieste el efecto corona con la consecuente presencia de la radiointerferencia mayor a lo establecido en la norma.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar la aplicación de un método de cálculo para el análisis de líneas de transmisión en presencia del efecto corona, considerando el efecto skin en los conductores.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- a. Identificar los parámetros eléctricos de la línea de transmisión Quencoro - Tintaya.
- b. Desarrollar la aplicación del método análisis de la interferencia electromagnética por efecto corona en líneas de transmisión de alta tensión en CA”
- c. Validar la precisión del método desarrollado.
- d. Evaluar distintas técnicas para la atenuación de radiointerferencia.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El efecto corona es motivo de pérdidas de potencia en líneas de transmisión, ruido audible y distorsión en la propagación de ondas. Los mencionados efectos pueden llegar a alcanzar valores económicamente importantes o molestias en la población aledaña a las líneas. La pérdida de potencia típica es de un 3% de la potencia transmitida por cada 100 km de la longitud de la línea.

También se puede mencionar que la descarga corona da origen a una serie de emisiones electromagnéticas a altas frecuencias que pueden interferir con el funcionamiento de algunos dispositivos electromagnéticos ubicados en la cercanía de las líneas.

Se encuentran algunos métodos para la predicción de niveles de radiointerferencia, los cuáles se fundamentan en la utilización de funciones de excitación y el cálculo de la intensidad de las corrientes de corona, para posteriormente determinar el campo eléctrico generado por la línea. Por lo tanto, algunos parámetros como las constantes de atenuación suelen tomarse de valores promedio para ciertas configuraciones de línea.

No obstante, existen instrumentos de medición de niveles de radiointerferencia (RI), los métodos de predicción de RI son de gran interés en las fases de diseño y planeación de líneas de transmisión de alta tensión.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL TRABAJO.

1.5.1 ALCANCES.

- “El desarrollo del método expuesto para el cálculo de perfiles de radiointerferencia generada por corona en una línea de transmisión, solo comprende a líneas de circuito simple”. (Tejada Martinez, 2008)
- ”La resistividad del terreno se toma en consideración en los cálculos de perfiles de radiointerferencia, de tal forma que, a diferencia de otros métodos, no es necesario hacer correcciones a los resultados finales con respecto a la resistividad de terreno”. (Tejada Martinez, 2008)
- “Con el método presentado, es posible determinar el nivel de radiointerferencia a cualquier distancia práctica de la línea de transmisión”. (Tejada Martinez, 2008)
- El método expuesto es aplicado en la línea Quencoro Tintaya.

1.5.2 LIMITACIONES

- “Las constantes de atenuación utilizadas en el cálculo de los niveles de radiointerferencia se obtienen a partir del cálculo de parámetros de la línea en particular, y para desacoplar el sistema se aplica descomposición modal, de tal forma que se pueden analizar líneas de transmisión con configuraciones geométricas arbitrarias. Este sistema no será analizado con mucho detalle debido al extenso conocimiento necesario para realizar los cálculos matemáticos”. (Tejada Martinez, 2008)
- “La validación del método computacional empleado, se realiza mediante comparaciones con mediciones experimentales publicadas por otros investigadores (Claude H.Gary .quien en 1971 publico una serie de tres artículos, Olsen y Chartier hicieron una comparación de varios métodos de cálculo de radiointerferencia desarrollados por diversos grupos de investigación, y optimizaron las fórmulas empíricas para la función de excitación)”. (Tejada Martinez, 2008)
- El método computacional propuesto se puede utilizar para el cálculo de perfiles de radiointerferencia sólo para líneas de transmisión de alta tensión en CA.

1.6 METODOLOGIA DE INVESTIGACION

1.6.1 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El estudio es de tipo descriptivo: Porque se ocupa de la descripción de datos y características de las líneas de transmisión. El objetivo es la adquisición de datos objetivos, precisos y sistemáticos, también es tipo analítico, porque consiste en la desmembración de un todo, descomponiéndolo en sus partes o elementos para observar las causas, la naturaleza y los efectos. Ya que posibilitara determinar los efectos producidos por la interferencia electromagnética en condiciones de operación de una línea de transmisión.

1.6.2 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Para la obtención de la información necesaria se adopta la técnica de observación científica y de análisis de contenido.

La técnica de observación se realiza de forma sistemática, tal es que:

Primero se obtiene la información aproximada de los datos de la línea que se analizó.

Para la verificación y actualización de datos se ha realizado un trabajo de inspección directa obteniendo datos de campo.

La técnica documental y de análisis de contenido

1.7 BASES TEÓRICAS.

MARCO LEGAL

Código nacional de electricidad (Suministro 2011) parte 2 reglas de seguridad para la instalación y mantenimiento de líneas aéreas de suministro eléctrico y comunicaciones.

Sección 21

Requerimientos Generales.

Norma IEC CISPR 18 del año 1982

Norma canadiense CAN3-C108.3.1-M84 (R2005).**1.8 HIPÓTESIS, VARIABLES E INDICADORES.****1.8.1 HIPOTESIS.**

El desarrollo de la aplicación de un método de predicción de perfiles de la radiointerferencia causados por las ondas electromagnéticas producidas por las líneas de transmisión, permitirá formular los criterios de mitigación de la radiointerferencia.

1.8.2 HIPOTESIS ESPECÍFICAS

- a. La identificación de los parámetros eléctricos de la línea de transmisión permitirá identificar sus valores.
- b. La utilización de funciones de excitación permitirá el cálculo de la intensidad de las corrientes de corona, calcular la intensidad de campo eléctrico y magnético resultantes en la vecindad de la línea, desarrollar el método de predicción y concluir con el cálculo de la radiointerferencia.
- c. El comparar los resultados obtenidos con otros, publicadas por algunos autores, permitirá validar el presente trabajo.
- d. La simulación del efecto corona mediante el uso de software especializado, permitirá predecir la existencia o no, de los perfiles de radiointerferencia.

1.9 VARIABLES**1.9.1 VARIABLES DEPENDIENTES.**

Radiointerferencia.

1.9.2 VARIABLES INDEPENDIENTES.

Nivel de tensión.

Densidad del aire.

Ruido audible.

1.9.3 VARIABLES INTERVINIENTES

Pérdidas de potencia

Calidad de recepción de una señal de audio, radio comunicación, de televisión o de telecomunicaciones.

1.9.4 INDICADORES

Nivel de interferencia (Db)

Tensión crítica disruptiva (Kv).

Porcentaje de pérdida de potencia (%)

Densidad del aire.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 INTRODUCCION

“El efecto corona es un fenómeno propio de los sistemas de alta tensión, el cual se presenta cuando el potencial de un conductor es lo suficientemente elevado para producir una intensidad de campo eléctrico igual o superior a la rigidez dieléctrica del medio gaseoso que lo rodea, que en el caso de las líneas de transmisión aéreas corresponde al aire. Debido a la alta intensidad de campo eléctrico el aire alrededor del conductor se ioniza y se convierte en conductor, lo cual puede representarse como un aumento en el diámetro del conductor” (Maruvada, 2000). En la Fig. 2.1 se muestra este fenómeno.

“La presencia de corona se manifiesta por luminiscencias, un sonido silbante y se percibe también la formación de ozono. Por otro lado, este fenómeno es causa de pérdidas de energía, distorsión en la propagación de ondas, así como de oscilaciones electromagnéticas de alta frecuencia que se transmiten a lo largo de la línea y que provocan perturbaciones en las señales de radio y televisión en sus inmediaciones (radiointerferencia) (Siegert, 1988)”.

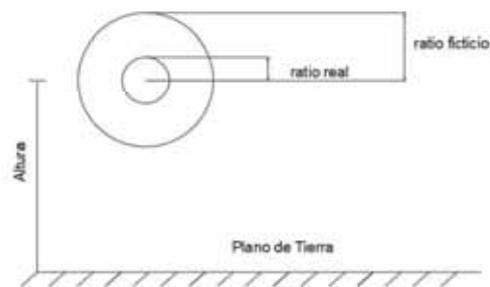


FIGURA 2.1. Conductor con efecto corona.

“Básicamente el efecto corona es función de dos elementos: el gradiente de potencial en la superficie del conductor y la rigidez dieléctrica del aire en la superficie, valor que a su vez depende de la presión atmosférica y la temperatura” (Siegert, 1988).

“En un campo eléctrico uniforme, a 25 °C y 760 mm Hg de presión, la ionización por impacto aparece al tener una intensidad de campo eléctrico de 29.8 kV/cm (valor pico), que corresponde a 21.1 kV/cm (valor eficaz o rms). El valor del gradiente de potencial para el cual aparece la ionización en la superficie del conductor se llama gradiente crítico o de inepción” (Maruvada, 2000).

“Los fenómenos principales ocasionados por el efecto corona pueden resumirse como sigue” (Siegert, 1988):

- Descarga luminosa.
- Ruido audible.
- Perdidas de potencia.
- Radiación electromagnética a altas frecuencias.
- Distorsión en la propagación de ondas.
- Generación de ozono
- Viento iónico.

2.2 PROCESO BÁSICO DE IONIZACIÓN.

“El aire es probablemente el aislante más importante utilizado en líneas de transmisión de alta tensión. Aparte de las cadenas de aisladores, se considera al aire como el aislamiento principal entre conductores y estructuras metálicas, así como entre conductores y el plano de tierra. Por lo anterior, es de gran importancia conocer las características físicas y eléctricas del aire, así como las condiciones bajo las cuales sus propiedades dieléctricas se alteran” (Maruvada, 2000).

“La física de la descarga corona envuelve el análisis de procesos de ionización complejos que se presentan en el aire que rodea al conductor energizado. El objetivo de este trabajo no es profundizar en las razones físicas que dan origen a la descarga corona, sino más bien, analizar una de las consecuencias de este fenómeno que es la interferencia electromagnética. Por esta razón sólo se consideran los fundamentos teóricos elementales” (Siegert, 1988).

“Básicamente, los iones y electrones libres en el aire, que han sido generados por

radiación cósmica o radioactiva, se ven expuestos a la influencia del campo eléctrico del conductor energizado. En el caso de corriente alterna, las partículas son atraídas y repelidas debido a que la polaridad cambia cada semiciclo. Si la intensidad del campo eléctrico es lo suficientemente elevado, las partículas adquieren la energía cinética necesaria para ionizar por colisión a otras partículas neutras, lo cual se conoce como ionización por impacto” (LaForest, 1981).

“La multiplicación de los electrones se ilustra en la Fig. 2.2. Durante el proceso de aceleración debido al campo eléctrico, el electrón colisiona con los átomos de nitrógeno, oxígeno y otros gases presentes, algo parecido al choque de dos bolas de billar. Los electrones pierden sólo una pequeña parte de su energía cinética en cada colisión. El proceso básico de ionización, es usualmente representado por” (Siegert, 1988):



“Donde A es el átomo neutro del gas, e es la carga del electrón y A^+ es el ión positivo. Después de que un electrón colisiona con un átomo, se libera otro electrón. Cada uno de estos electrones puede entonces liberar dos electrones más. La reacción en cadena provoca que la cantidad de electrones incremente rápidamente” (Siegert, 1988). “El número de electrones formados durante el proceso de la avalancha fue determinado por Townsend quien a través de varios experimentos de descarga en gases, determinó un coeficiente llamado primer coeficiente de ionización de Townsend, con el cual es posible determinar el número de electrones producidos por un electrón viajando a una distancia de 1 cm bajo la influencia de un campo uniforme” (LaForest, 1981).

La corriente de la descarga en el proceso de la avalancha se obtiene de acuerdo con:

$$I = I_0 e^{\alpha_1 d} \quad (2.2)$$

Donde:

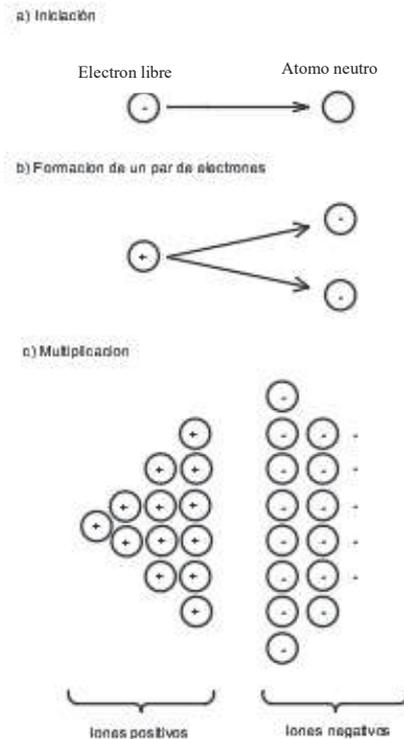
I = corriente de la descarga.

I_0 = Corriente inicial en el gas debido a fuentes externas.

α_1 = primer coeficiente de ionización de Townsend.

d = distancia del gap.

El coeficiente α_1 depende de la intensidad del campo eléctrico, presión del gas y



otras condiciones que influyen en la generación de pares de electrones (LaForest, 1981).

FIGURA 2 2.Avalancha de electrones de un electrodo negativo.

2.3 MEDICIÓN DE LA CORRIENTE CORONA

“Una de las configuraciones de electrodos más utilizadas para el estudio experimental del efecto corona es el arreglo punta – plano” (Sinha, 1997). “El radio de la curvatura de la punta se selecciona de acuerdo al grado de no uniformidad de campo que se desea. La tensión es aplicada al electrodo punta mientras que en el electrodo plano se realizan las mediciones de la corriente corona. La polaridad del electrodo energizado determina la dirección del gradiente de potencial y el flujo de las partículas cargadas” (Nasser, 1971). “Existen también otras geometrías de electrodos comúnmente utilizadas como los arreglos plano-plano, esfera- plano, conductor-plano y conductor-cilindro” (Sinha, 1997).

“En el desarrollo de este trabajo se llevó a cabo una medición experimental de corriente corona en CD, realizada en el laboratorio de alta tensión de la ESIME – IPN

Unidad Zacatenco. A fin de simular una línea de transmisión, se utilizó un arreglo que consta de un conductor colocado en el eje axial de un cilindro. Dicho cilindro está dividido en tres secciones: la parte central es utilizada para la medición de la corriente corona mientras que los extremos sirven de guarda para eliminar los efectos de borde. El cilindro está hecho de aluminio y tiene un diámetro de 34.5 cm. El conductor utilizado es de cobre de 1 mm de diámetro, con una imperfección a la mitad de su longitud con el fin de propiciar la aparición de efecto corona en ese punto. La tensión aplicada fue de 14.2 kV de CD de polaridad positiva” (Sinha, 1997).

“Para la generación de alta tensión de CD, se utilizó una fuente BERTAN serie 205B, de 50 kV, 0.3 mA. La corriente corona se mide a través de la caída de tensión en una resistencia de 1 k Ω , utilizando un osciloscopio Tektronix TDS684B de 4 canales, 5 gigamuestras por segundo y un ancho de banda de 1 GHz. También se utilizaron cables coaxiales de 50 Ω con una carga en terminales también de 50 Ω con el fin de evitar reflexiones. En la Fig. 2.3 se muestra un esquema del arreglo utilizado y en la Fig. 2.4 se observa la gráfica de la corriente corona medida, en donde es posible apreciar la forma de onda pulsada típica que adopta dicha corriente en uno de sus regímenes” (Sinha, 1997).

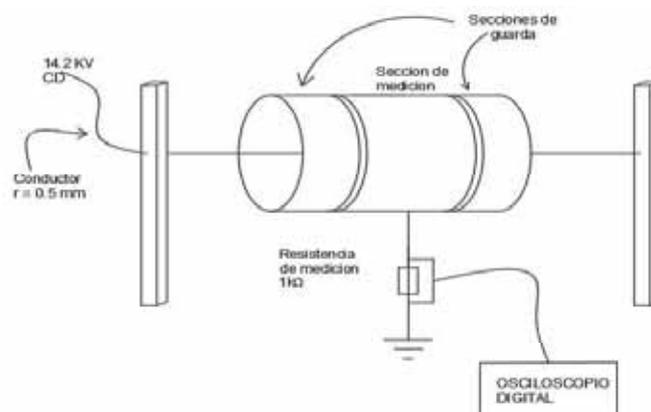


FIGURA 2.3. Arreglo experimental para la medición de corriente corona

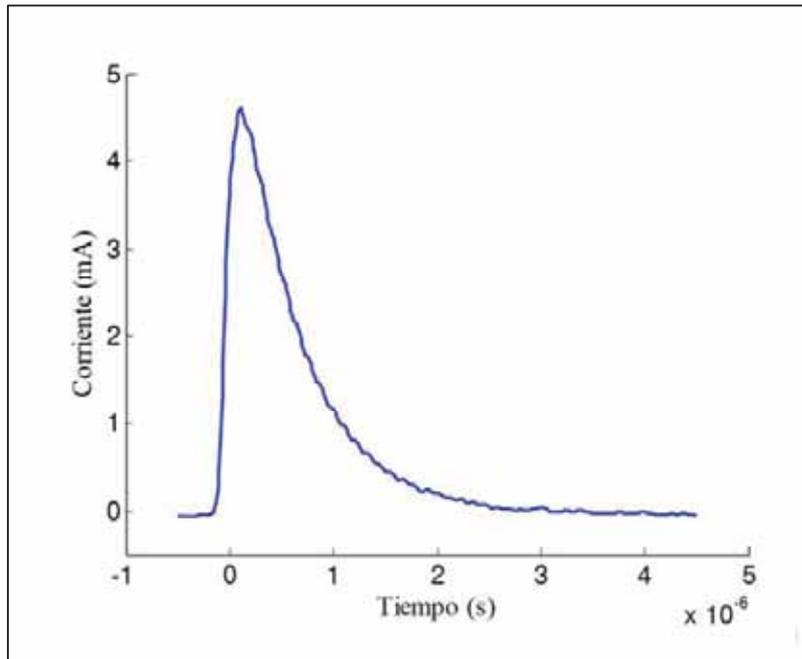


FIGURA 2 4. Pulso de corriente corona medida en un arreglo coaxial.

2.4 GRADIENTE DE INCEPCIÓN DE CORONA

“El cálculo del gradiente eléctrico en la superficie del conductor, en particular el denominado gradiente crítico o de incepción E_c , a partir de cual se observan descargas del tipo corona, es de gran importancia para el cálculo de pérdidas por corona, ruido audible, así como para determinar los niveles de radiointerferencia que se generan debido a este fenómeno” (Siegert, 1988). “El gradiente de incepción de corona es función del diámetro del conductor, la condición de su superficie, polaridad (en el caso de CD), además de factores ambientales como la presión atmosférica y la temperatura. La fórmula de Peek, obtenida empíricamente, es la más empleada para el cálculo del gradiente de incepción de corona en conductores

Cilíndricos” (Maruvada, 2000).

(2.3)

$$E_c = mE_o\delta \left[1 + \frac{k}{\sqrt{\delta r}} \right]$$

donde (para CA):

E_0 es la rigidez dieléctrica con un valor usual de 29.8 kV/cm (valor pico) o 21.1 kV/cm (valor eficaz o rms).

K es una constante empírica dada por:

0.301 para el caso de dos conductores paralelos sobre tierra.

0.308 para una geometría cilíndrica concéntrica.

m es un factor de irregularidad de la superficie del conductor dado por:

1 para conductor ideal (limpio y sin irregularidades).

0.75 a 0.85 para un conductor trenzado (valor típico).

0.3 a 0.6 bajo condiciones de lluvia, nieve, niebla pesada.

r = radio del conductor en cm.

δ es la densidad relativa del aire dada por:

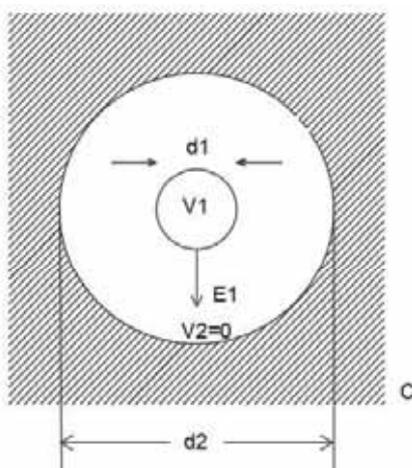
$$\delta = \frac{273 + t_0 p}{273 + t p_0}$$

Donde:

t es la temperatura y

p es la presión del aire, t_0 y p_0 son valores estándar ($t_0 = 25^\circ \text{C}$, $p_0 = 760 \text{ mm Hg}$).

A continuación, se presentan las fórmulas necesarias para el cálculo del gradiente de inyección en los arreglos mostrados en las Figs. 2.5 a 2.7 [2].



$$E_1 = \frac{2V_1}{d_1 \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}$$

$$C = \frac{55.6 \times 10^{-12}}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}$$

$$E_c = 31m\delta \left(1 + \frac{0.436}{\sqrt{\delta d_1}}\right) \text{ kV/cm}$$

$$V_c = E_c \left(\frac{d_1}{2}\right) \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$$

FIGURA 2.5. Cilindros concéntricos

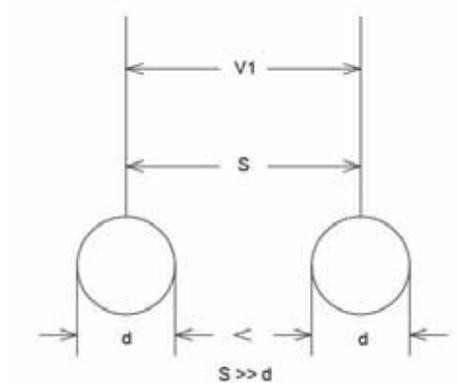


FIGURA 2 6. Conductores paralelos.

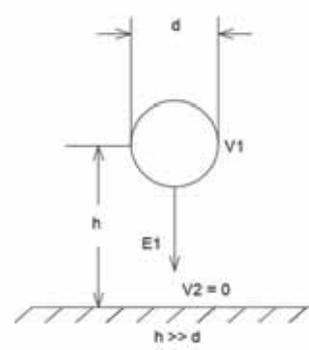


FIGURA 2 7. Conductor paralelo a un plano.

$$E_1 = \frac{V_1}{d \ln\left(\frac{2S}{d}\right)}$$

$$E_1 = \frac{2V_1}{d_1 \ln\left(\frac{4h}{d}\right)}$$

$$C = \frac{27.8 \times 10^{-12}}{\ln\left(\frac{2S}{d}\right)}$$

$$C = \frac{55.6 \times 10^{-12}}{\ln\left(\frac{4h}{d}\right)}$$

$$E_c = 30m\delta \left(1 + \frac{0.426}{\sqrt{\delta d}}\right) kV/cm$$

$$V_c = E_c d \ln\left(\frac{2S}{d}\right)$$

$$V_c = E_c \left(\frac{d}{2}\right) \ln\left(\frac{4h}{d}\right)$$

Donde:

E_1 = Gradiente en la superficie del conductor en kV/cm.

C = Capacitancia en F/m.

E_c = Gradientes de inyección de corona en kV/cm.

V_c = Tensión de inyección de corona en kV.

Para el cálculo de E_c se consideran todas las dimensiones en centímetros.

2.4.1 MÉTODO DE CÁLCULO DEL GRADIENTE SUPERFICIAL PARA UN HAZ DE CONDUCTORES

“Se menciona un método utilizado para el cálculo del gradiente máximo superficial de multiconductores por fase, el cual mostramos a continuación” (Buenaventura Ronquillo, 2011)..

1) Método de Mark y Mengele

“Este método se lo utiliza para el cálculo de gradiente máximo superficial en líneas con conductores en haz. Su aplicación se divide en tres etapas” (Buenaventura Ronquillo, 2011):

Primera Etapa

“Consiste en reemplazar el haz de conductores por un conductor único equivalente de igual capacitancia; por lo tanto, para un haz de V subconductores, distribuidos regularmente en un círculo de radio R , como lo muestra la figura 2.8” (Buenaventura Ronquillo, 2011).

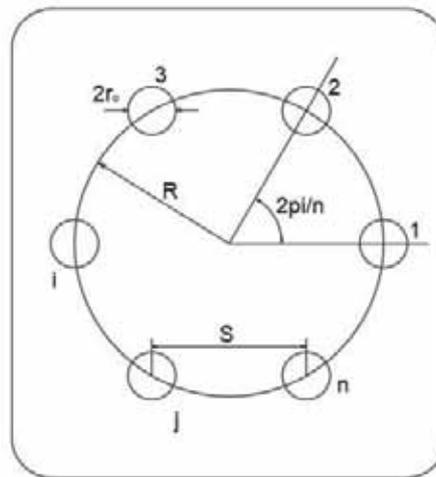


FIGURA 2.8. Distribución geométrica de un haz de conductores

$$R = \frac{S}{2SEn \frac{\pi}{n}}$$

Donde:

R = radio del círculo de los subconductores en cm.

S = separación de los subconductores en cm.

n = número de subconductores.

“Un conductor único colocado en el centro del haz, de igual capacitancia que este, debería llevar la misma carga total, al mismo potencial. El radio de este conductor ficticio es” (Buenaventura Ronquillo, 2011):

$$r_{eq} = \sqrt[n]{nr_0 R^{n-1}}$$

r_{eq} = radio equivalente del haz de igual capacitancia en cm.

r_0 = radio del subconductor en cm.

Segunda Etapa

Se calcula el gradiente del conductor:

$$E(\alpha) = E_{sub} \left[1 + \frac{2 + (n-1)r_0}{S} SEN \frac{\pi}{n} COS \alpha \right]$$

Donde

α = ángulo que determina la posición de un campo.

E_{sub} = Voltaje promedio del gradiente en la superficie del subconductor en kVp/cm o kVrms/cm.

El voltaje promedio del gradiente en la superficie del subconductor se puede determinar por:

$$E_{sub} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{U}{nr_0 \ln \frac{D}{r_{eq}}}}$$

Donde

D = Distancia media geométrica entre fases en cm.

U = Voltaje nominal fase-fase en kV.

El gradiente máximo en la superficie del conductor, puede ser calculado fijando α a cero en $E(\alpha)$, es decir, después de sustituir E_{sub} en $E(\alpha)$, El gradiente máximo será:

$$E_{max} = E_{sub} \left[1 + \frac{2+(n-1)r_0}{S} SEN \frac{\pi}{n} \right]$$

Tercera Etapa

“El gradiente superficial promedio se define como el promedio aritmético de los gradientes superficiales medios de subconductores individuales. Y el gradiente superficial promedio máximo del haz esta dado por la expresión” (Buenaventura Ronquillo, 2011):

$$E_M = E_{max} \left[1 + \frac{r_0}{R} \right]$$

“Para el caso de conductor hecho con hebras existe una expresión en función

del gradiente superficial promedio y del ángulo sobre la periferia del conductor debido a la no uniformidad del gradiente de voltaje en esta; la expresión está dada por” (Buenaventura Ronquillo, 2011):

$$E(\theta) = E_M \left[1 + \frac{r_H}{r_0} \cos\theta \right]$$

Donde:

r_H = radio de la hebra.

r_0 = radio medio del conductor.

De esto resulta como campo superficial

$$E_{max} = E_M \left[1 + \frac{r_H}{r_0} \right]$$

“Similar a un solo conductor, la controlabilidad teórica de la descarga de corona debe satisfacer esta condición” (Buenaventura Ronquillo, 2011):

$$E_{max} < E_c = 30m\delta \left[1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right]$$

“Es decir, el gradiente eléctrico del conductor E_{max} debe ser menor que el E_c del gradiente del inicio de la corona para limitar teóricamente descarga de corona (Buenaventura Ronquillo, 2011).

2.5 OTROS FENÓMENOS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE LA CORONA

2.5.1 GOTAS DE AGUA

“Las condiciones atmosféricas influyen considerablemente en la magnitud del efecto corona. La lluvia hace aumentar las perdidas por efecto corona a valores unas diez veces mayor de los que se obtienen con buen tiempo.

Durante los periodos de lluvias, se forman gotas de agua a lo largo y debajo del conductor, el cual hace que el campo eléctrico presente una irregularidad de forma puntual alrededor del conductor, dando como resultado un incremento en el efecto corona” (Buenaventura Ronquillo, 2011).

2.5.2 DISCONTINUIDAD SUPERFICIAL

“Los conductores de las líneas de transmisión están formados por varios hilos

enrollados helicoidalmente; además los conductores nunca están perfectamente limpios y al ser manejados, especialmente durante la instalación, se raspan en cierto grado” (Buenaventura Ronquillo, 2011).

“Las irregularidades de la superficie, ya sean construidas por los hilos individuales del cable, la suciedad depositada sobre el cable o las partes raspadas, hacen que aumente la intensidad de campo eléctrico localmente.

La ionización se produce en esos puntos para un gradiente de potencial superficial menor que el necesario para producirla si la superficie de conductor fuese lisa y limpia” (Buenaventura Ronquillo, 2011).

“Para tomar en cuenta esta reducción del gradiente superficial crítico se utiliza un factor de superficie m , que es el producto de dos coeficientes: un coeficiente que toma en cuenta el estado de la superficie del conductor m_c y un coeficiente que toma en cuenta el estado ambiental al que se encuentra expuesto el conductor m_t el cual se estima por” (Buenaventura Ronquillo, 2011):

TABLA 2 Factores de superficie m

Factor m_c superficial	
1	Conductor liso ideal
0.88-0.96	Conductor nuevo y limpio
0.80-0.87	Conductor áspero envejecido
0.50-0.70	Conductor tratado deficientemente
Factor m_t ambiental	
1	Seco
0.80	Húmedo
0.16-0.25	Lluvia

2.5.3 DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE

“Las condiciones atmosféricas influyen en el valor del gradiente superficial crítico en proporción directa a la presión atmosférica y en proporción inversa a la temperatura ambiente. Estos factores a combinarse forman lo que se llama, el factor de densidad relativa del aire δ y se expresa” (Buenaventura Ronquillo, 2011).

$$\delta = \frac{0.3921 h}{273 + T} \qquad \log h = \log 76 - \frac{Y}{18336}$$

Donde:

Y: Altura topográfica del proyecto: (m)

h: presión barométrica del aire, en cm Hg.

T: temperatura del aire, en °C.

2.5.4 HUMEDAD

“La humedad relativa de la atmosfera puede variar por dos motivos. Si existe una superficie de agua sometida a evaporación, esta hará aumentar la humedad relativa. El otro motivo es una variación de la temperatura. Aunque no se añada vapor de agua a la atmosfera, un descenso de la temperatura se traduce en un aumento de la humedad relativa. Este hecho es automático y consecuencia lógica de la disminución de la capacidad de la atmosfera para contener el vapor de agua al descender la temperatura, de esta forma, la cantidad de vapor de agua ya existente representa un porcentaje más alto de la capacidad total de la atmosfera. De manera similar, un ascenso de la temperatura se traduce en una disminución de la humedad relativa, aunque el vapor de agua presente en el aire sea el mismo. La temperatura crítica correspondiente a la saturación y por debajo de la cual tiene lugar la condensación, se denomina punto de rocío” (Osorio, 2006).

“El vapor de agua actúa como gas electronegativo con una afinidad apreciable para capturar electrones para las moléculas de agua. Esta influencia beneficiosa del vapor de agua depende fuertemente del índice de crecimiento de las descargas repetitivas por corona. La influencia es mucho más pronunciada para propagaciones lentas de larga duración de las descargas repetitivas por corona para un microsegundo rápido o avalanchas más cortas. La humedad afecta al efecto corona en los conductores de dos maneras. Primera, una humedad más alta suprime avalanchas del electrón y, segunda, la humedad más alta crea una mayor concentración de vapor de agua en el conductor y crea más puntos corona incrementando las pérdidas” (Follia, 1982).

2.6 PÉRDIDAS POR CORONA

“Como se ha mencionado previamente, adicionalmente a la corriente, la descarga corona propicia la aparición de otros fenómenos como descarga luminosa, calor, ruido audible y radiointerferencia, los cuales conllevan una liberación de energía

que bien puede expresarse como una pérdida de potencia por unidad de longitud (kW/km)” (Siegert, 1988). “Las pérdidas de potencia debidas a corona en líneas de transmisión y sus repercusiones económicas, fueron las primeras consecuencias de la descarga corona estudiadas en los inicios de la transmisión en alta tensión, ya que contribuyen en la reducción de la eficiencia de los sistemas de transmisión. Los estudios que se han realizado con diferentes geometrías de conductores, gradientes, tipo de tensión y condiciones ambientales, han mostrado que en ambientes secos se tienen pérdidas de unos pocos kilowatts por kilómetro, mientras que en ambientes de lluvia o nieve se presentan pérdidas de cientos de kilowatts por kilómetro” (LaForest, 1981).

“Por otro lado, se ha encontrado que en general las pérdidas por corona son sólo una pequeña parte de las pérdidas por efecto Joule (I^2R). Además, conforme aumentan los niveles de tensión de transmisión, las pérdidas por corona tienen un impacto cada vez menor en la selección del tamaño del conductor y geometría de la línea, mientras que el ruido audible y la interferencia electromagnética generados tienen cada vez mayor importancia” (LaForest, 1981).

2.6.1 MÉTODOS DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR CORONA

Para el cálculo de pérdidas por corona se utilizan métodos que se diferencian esencialmente por el tipo de conductor de la línea y por las condiciones atmosféricas (Siegert, 1988).

1) Cálculo de Pérdidas por Corona por Peek.

En 1911, Peek y su grupo determinaron una fórmula para el cálculo de pérdidas por corona la cual es expresada por la siguiente relación cuadrática (LaForest, 1981):

$$P_{cor} = k(V - V_c) \times 10^{-5} \text{ kW/km} \quad (2.4)$$

donde:

$$k \text{ es un factor dado por } k = \frac{242}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{s}}$$

P_{cor} = pérdidas en kW/km.

V = tensión de fase a tierra en kV (rms).

V_c = tensión de inyección de corona a tierra en kV (rms).

f = frecuencia en Hz.

δ = densidad del aire.

r = radio del conductor en cm.

s = separación entre conductores en cm.

“Sin embargo, esta fórmula no es válida para los valores cercanos a la tensión de inyección. En 1924, Ryan y Henline propusieron la siguiente fórmula para el cálculo de pérdidas en ambiente seco” (LaForest, 1981):

$$P_{cor} = 4fCV(V - V_c) \quad (2.5)$$

Donde

P_{cor} = pérdidas en kW/km.

V = tensión de fase a tierra en kV (rms).

V_c = tensión de inyección de corona a tierra en kV (rms).

f = frecuencia del voltaje aplicado en Hz.

C = capacitancia de línea tierra del conductor.

“En vista de que la potencia es proporcional a VI , y por ende sus pérdidas también lo son, puede suponerse que el término $4fC(V-V_c)$ representa una corriente de corona equivalente, la cual se presenta cuando la tensión del conductor excede la tensión de inyección” (LaForest, 1981).

En 1933 en una reunión de la AIEE (American Institute of Electrical Engineers), Peterson expuso “una fórmula para el cálculo de pérdidas por corona para una línea monofásica bajo ambientes favorables”:

$$P_{cor} = \frac{20.46 \times 10^{-6}}{\left[\log_{10} \left(\frac{2s}{d} \right) \right]^2} fV^2F \quad \left[\frac{kW}{km} \right] \quad (2.6)$$

donde:

P_{cor} = pérdidas en kW/km.

f = frecuencia en Hz.

V = tensión de fase a tierra en kV (rms).

s = separación entre conductores en cm.

d = diámetro del conductor en cm.

F = factor determinado por experimentos el cuál es función de la relación V/V_c .

2) Método de Peterson

“En este procedimiento se calcula primero la tensión característica de la línea por fase (e_d), luego, se calcula la razón entre la tensión por fase de servicio y la tensión característica de la línea, con esta última se calcula un factor (ϕ) que se obtiene de las curvas mostradas en las figuras 2.9 y 2.10, finalmente se aplica la ecuación de Peterson para pérdidas corona” (LaForest, 1981).

“Para una mejor aplicación del algoritmo, éste se ha subdividido en las siguientes etapas” (LaForest, 1981):

Primera etapa

Para el cálculo de e_d existen tres casos importantes, dos de ellos para conductor en hebra:

1) Conductores redondos de superficie lisa y limpia:

$$e_d = 48.6m\delta^{\frac{2}{3}}R \log_{10} \frac{D}{R}$$

En que:

R : radio del conductor en cm.

D : distancia entre fases en cm.

δ : densidad relativa del aire.

e_d : tensión característica de la línea por fase, en kVefectivo fn.

2) Para cables de varios hilos, que tienen 12 o más hebras en la capa exterior:

$$e_d = 48.6m\delta^{\frac{2}{3}} \frac{[\log_{10} \frac{D}{cR_h} + (n_h - 1) \log_{10} \frac{D}{R - cR_h}]}{\frac{1}{cR_h} + \frac{n_h - 1}{2(R - cR_h)}}$$

Con:

$$c = 1 - \frac{\left[\sin \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n_h} \right]}{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n_h}}$$

n_h : número de hebras de la capa exterior.

R_h : radio hebra capa exterior en cm.

R : radio medio del conductor en cm.

3) Para un cable que tiene 6 hebras en la capa exterior:

$$e_d = 35.47m\delta^{\frac{2}{3}}R(\log_{10}\frac{D}{R} + 0.0677)$$

Valores de m propuestos:

0.87 -0.90: Para condiciones comunes.

0.67 - 0.74: Para conductores no lavados.

0.912- 0.93: Para conductores lavados con un disolvente de grasas.

0.885: Escobillados con una escobilla de alambre.

1.000: Pulido.

0.72 - 0.75: Conductores arrastrados y sucios con polvo.

0.945: Después de 5 meses expuestos a la acción atmosférica.

0.92: Sometido a la acción atmosférica, humedad baja de día.

0.78: Idem, pero de noche.

Segunda etapa:

Se calcula enseguida la razón V/ed.

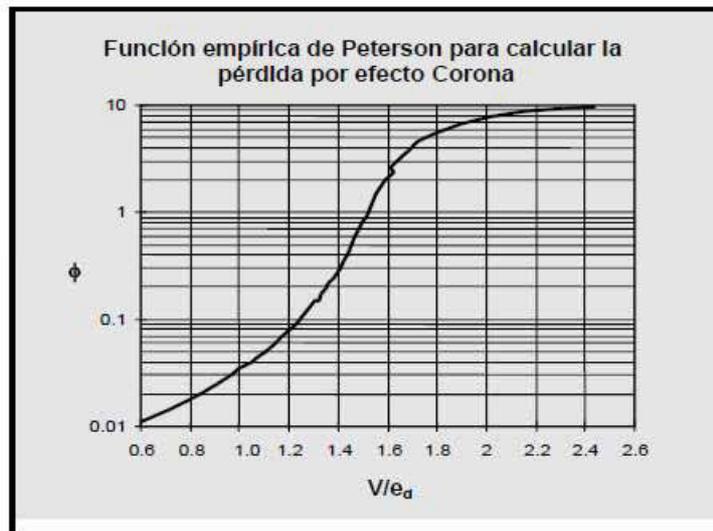


FIGURA 2.9. Función de Peterson para cálculo de pérdidas por Efecto Corona con razón (V/e_d) entre 0.6 y 2.4.

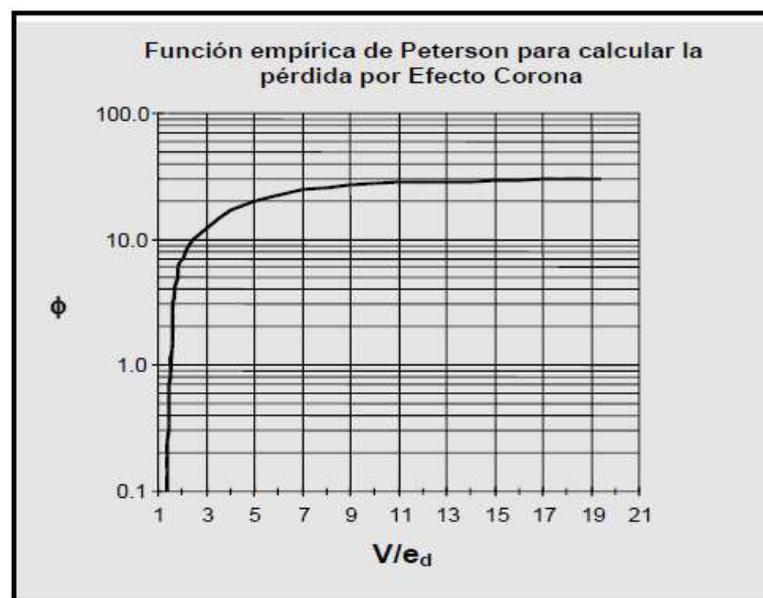


FIGURA 2.10. Función de Peterson para cálculo de pérdida por Efecto Corona con razón (V/e_d) entre 1 y 19

Tercera etapa:

Determinado ϕ , se calcula la pérdida por efecto corona para buen tiempo por la siguiente relación:

$$P_{PETERSON} = \frac{20.95 * 10^{-6} f V^2}{\left[\log_{10} \frac{D}{R}\right]^2} \phi$$

$P_{PETERSON}$: Potencia de pérdida por corona, en kW / km / fase.

f : frecuencia del sistema, en Hz.

V: tensión de servicio en KV efect.fn.

3) Método de Electricité de France

“Los investigadores C. Gary y M. Moreau desarrollaron dos métodos para el cálculo de pérdida corona para conductor tipo en haz. Uno de estos métodos es aplicable a condiciones climáticas de buen tiempo y el otro para mal tiempo.

Método para buen tiempo” (Jewell-Larsen, 2004).

Para un conductor fasciculado de n subconductores por fase se da la siguiente relación empírica para PEDF: potencia de pérdida por corona, kW /km / fase:

$$P_{EDF} = \frac{P_0 r^{1.8} (n + 6)^2 f}{50}$$

Donde:

f: frecuencia de la tensión en Hz.

r: radio del subconductor en cm.

n: número de subconductores.

P_0 : es un factor de pérdida de potencia que se obtiene de la figura siguiente, considerando el gradiente relativo como razón entre el gradiente máximo del haz y el campo eléctrico crítico del subconductor liso, E_0 .

$$E_0 = g_o \delta \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{r \delta}} \right)$$

E_0 : campo eléctrico crítico del subconductor liso ideal, en kVefect.

r : radio del subconductor, en cm.

g_o y δ : son los descritos en el método de Peek.

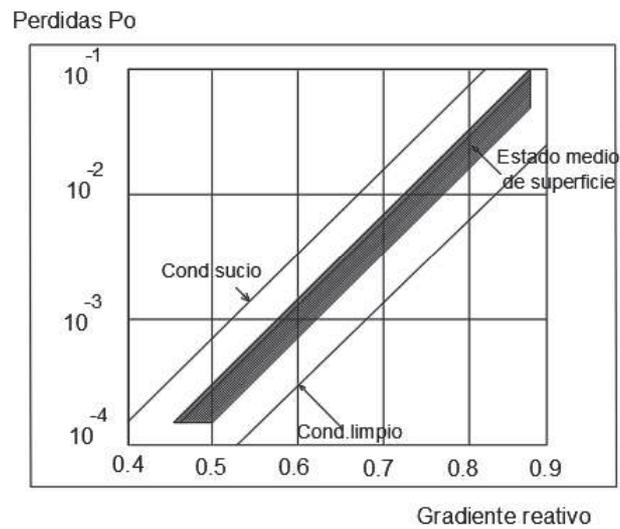


FIGURA 2 11.Ábaco para pérdidas en conductores secos.

Método para mal tiempo

“Este método es un proceso analítico desarrollado rigurosamente y verificado experimentalmente con mediciones en líneas y en jaulas de prueba. Fueron utilizadas configuraciones en haz de 1 a 8 subconductores, con diámetros entre 2.0 y 5.8 cm por conductor” (Jewell-Larsen, 2004).

La pérdida corona para mal tiempo queda determinada por:

$$P_{EDF} = kP_e$$

$$k = \frac{f}{50} (nr\beta)^2 \frac{\log_{10} \left(\frac{R_0}{R_c} \right) \log_{10} \frac{\rho}{R_0}}{\log_{10} \frac{R_0}{\rho}}$$

Donde:

k: factor que depende de las características geométricas de la línea y viene dado por la expresión.

f: frecuencia del sistema, en Hz.

r: radio del subconductor, en cm.

R_0 : radio del conductor a potencial cero, de la línea coaxial equivalente, en cm.

R_c : radio del conductor único equivalente de igual capacidad, en cm.

ρ : radio medio de emigración de la carga espacial, en cm.

$$\rho = 25\sqrt{nr}$$

$$\beta = \frac{1 + 0.308}{\sqrt{r}}$$

Pe: pérdida específica corona, que depende del campo eléctrico relativo E^* y del estado de superficie de los conductores “m”, se obtiene de la figura 2.12 y 2.13 considerando el gradiente relativo como la razón entre el gradiente promedio y el campo eléctrico de Peek.

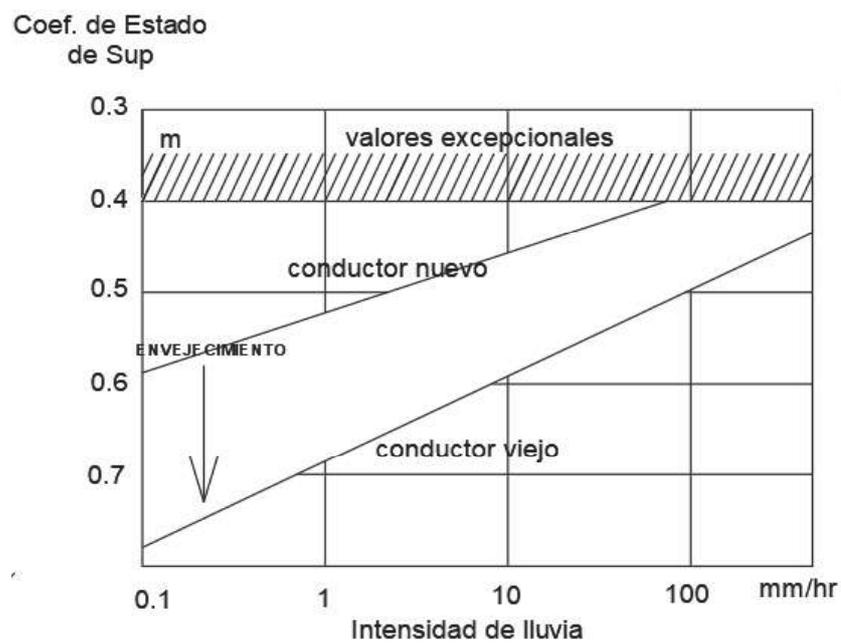


FIGURA 2.12. Abaco para determinación de m

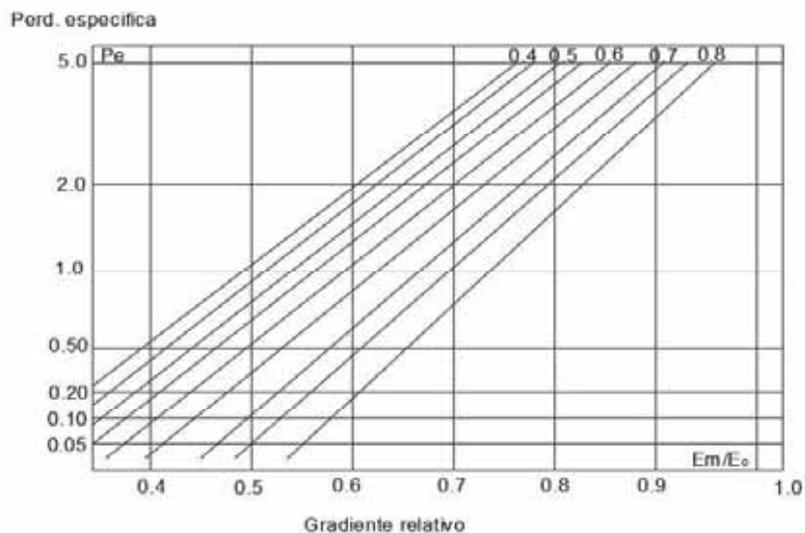


FIGURA 2 13. Pérdida específica corona

4) Métodos empíricos

“Debido a que existe una gran necesidad de formular un método que permita encontrar con exactitud las pérdidas por efecto corona producidas en una línea de transmisión, se ha considerado elaborar un método empírico para el cálculo de las mismas, en base al análisis y coordinación de los datos experimentales que se han acumulado durante varios años” (Buenaventura Ronquillo, 2011).

“El método desarrollado es basado en la observación experimental de la curva de pérdida de la corona vs el voltaje, para diferentes tamaños de cables utilizados en las líneas de transmisión de alta tensión. Una vez establecida la forma de la curva característica, el problema se reduce al desarrollo de reglas empíricas para determinar su ubicación bajo condiciones específicas” (Buenaventura Ronquillo, 2011).

“El factor m , para un mismo valor de intensidad de lluvia puede variar en 20 -30 %, dependiendo del grado de envejecimiento del conductor. Esta variación puede traducirse perfectamente en una variación de hasta 100 % en las pérdidas específica P_e , con bajas intensidades de lluvia, y bajo campo eléctrico” (Buenaventura Ronquillo, 2011).

En la figura 2.14 se observa una curva típica para pérdidas por efecto corona.

“Al parecer el nivel de pérdidas es mayor en el punto donde la transición de la pendiente es mayor. En estos casos las curvas de aluminio trenzado son más pronunciadas que las de cobre trenzado. La curva de los cables trenzados que se encuentran a la intemperie cae más rápido en la zona inferior que aquellos que no *lo están*” (Buenaventura Ronquillo, 2011).

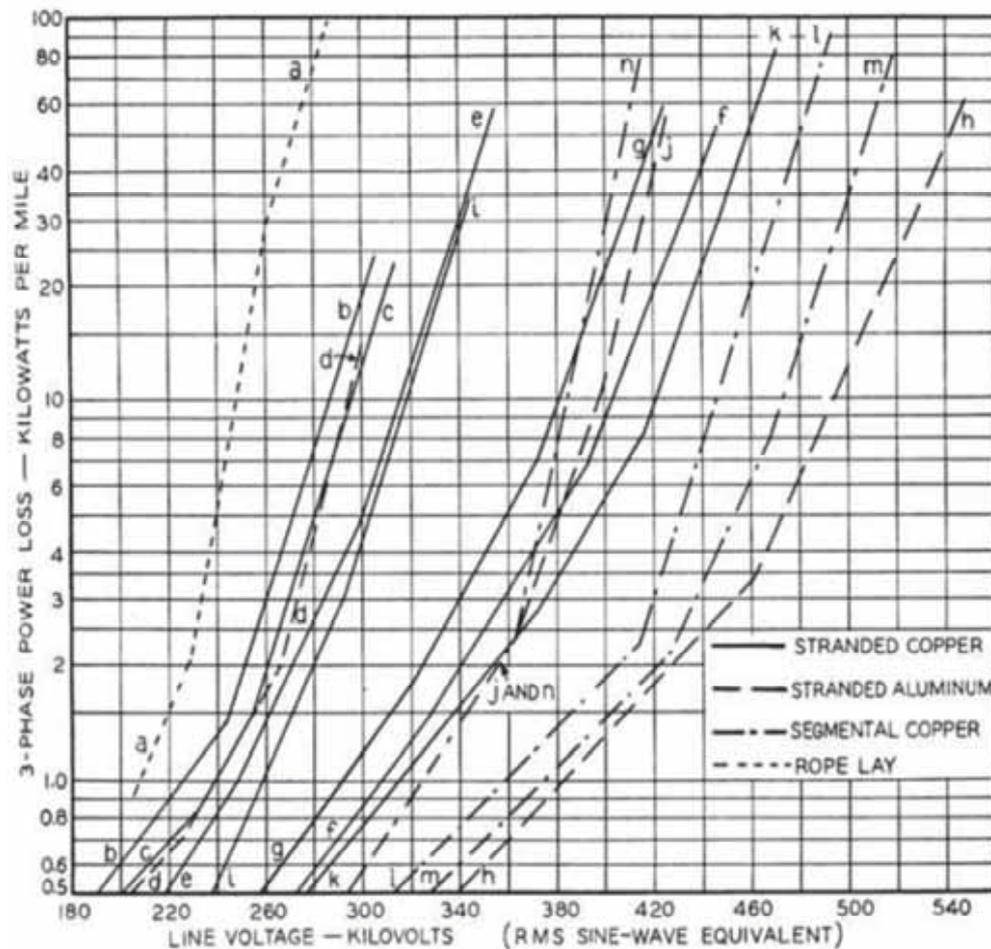


FIGURA 2 14. Curvas de referencia

“Para poder observar con mayor facilidad en la figura 2.15 se agrupan curvas que son razonablemente típicas para varios casos, sin embargo, es recomendable hacer las evaluaciones directamente de la figura 2.14” (Buenaventura Ronquillo, 2011).

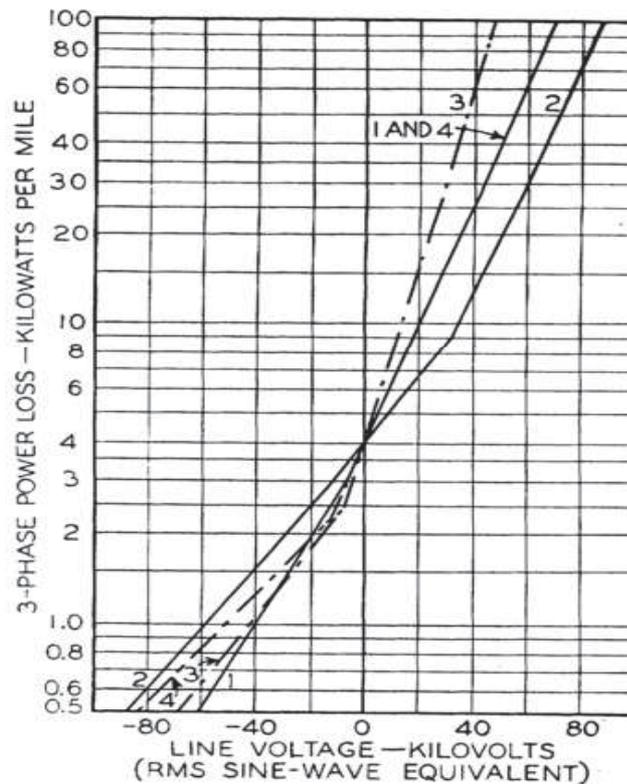


FIGURA 2 15. Curva típica de efecto corona para cables en la intemperie

Curva1: Líneas concéntricas con diámetro de 0.9 a 1.0 pulgadas.

Curva2: Líneas concéntricas con diámetro de 1.4 a 1.5 pulgadas.

Curva3: Segmentaciones lisas con diámetro de 1.1 pulgadas.

Curva4: Segmentaciones lisas con diámetro de 1.4 pulgadas (Buenaventura Ronquillo, 2011).

2.7 RUIDO AUDIBLE

“Actualmente, el ruido audible generado por líneas de transmisión de alta tensión con corona se ha considerado un asunto de gran importancia” (F. Kiessling, 2003). “Generalmente, en un ambiente seco el gradiente eléctrico en la superficie de los conductores se encuentra por debajo del gradiente de inyección de corona, por lo cual están presentes muy pocas fuentes de corona. El ruido audible se hace presente principalmente bajo malas condiciones climáticas como lluvia o nieve. Sin embargo, se puede decir que los sistemas de transmisión contribuyen muy poco en la generación de ruido audible comparado con otras fuentes” (F. Kiessling, 2003).

“La importancia del ruido audible generado por líneas instaladas en poblaciones rurales es mínima debido a que la densidad de población es baja” (Siegert, 1988). “Sin embargo, en las grandes ciudades se ha desarrollado la tendencia de controlar el ruido debido a las consecuencias físicas en los seres humanos. Aunque en un principio las líneas de transmisión no habían sido objeto de reclamos debido al ruido audible, el uso de tensiones cada vez mayores ha propiciado consecuentemente que los niveles de ruido sean más intensos” (Siegert, 1988).

“Es muy difícil definir el nivel de ruido de una línea de transmisión que puede ser tolerado, no obstante, es muy común recibir quejas de la población cuando los niveles de ruido son mayores a 55 dB. Para áreas residenciales es recomendable no sobrepasar los 45 dB” (Siegert, 1988).

2.7.1 CALCULO DE RUIDO AUDIBLE

“Para obtener el nivel total de ruido de una línea de transmisión, primeramente, se debe de calcular el potencial de ruido de cada uno de los conductores con la siguiente ecuación obtenida empíricamente” (Siegert, 1988).

$$NP_{Ai} = 164.6 + 120 \log E_i + 55 \log r_{e,i} \quad (2.7)$$

donde:

E_i es la intensidad de campo eléctrico en kV/cm y

$r_{e,i}$ es el radio equivalente de acuerdo con:

$$r_c = r \text{ para } n_c \leq 2 \quad (2.8)$$

$$r_c = 0.58 n_c^{0.48} r \text{ para } n_c \geq 3 \quad (2.9)$$

donde:

n_c es el número de subconductores y

r el radio del subconductor en mm.

El nivel de ruido total en algún punto cercano a la línea puede ser determinado por

$$NP = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^n \exp [0.23(NP_{Ai} - 11.4 \log D_{Li} - 5.8)] \right\} \quad (2.10)$$

donde:

n es el número de fases y D_{Li} la distancia en metros entre el conductor i y el punto de referencia (punto de medición).

2.8 RADIOINTERFERENCIA

“Esta es la consecuencia del efecto corona de principal interés en este trabajo. La interferencia electromagnética puede definirse como una degradación en el desempeño de un equipo, canal de transmisión o sistema causado por un disturbio electromagnético” (Maruvada, 2000). “Debido a la naturaleza pulsante de las corrientes debidas a corona, se generan campos electromagnéticos que producen perturbaciones en un amplio rango de frecuencias en la operación de sistemas de comunicación. En el Capítulo 3 se profundizará más acerca de los aspectos relacionados con este fenómeno” (Maruvada, 2000).

2.9 DISTORSIÓN EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS

“Otro fenómeno de importancia relacionado con el efecto corona es la distorsión de las ondas viajeras en la respuesta transitoria de las líneas de transmisión. Aunado a las investigaciones experimentales en laboratorios de alta tensión efectuadas por varios grupos de investigación, existen otros que se han enfocado al desarrollo de modelos matemáticos del efecto corona para estudios de transitorios electromagnéticos” (Maruvada, 2000). “Generalmente, el efecto corona es modelado como una capacitancia no lineal dependiente de la tensión que es añadida a la capacitancia geométrica de la línea. Este concepto general del modelo de corona ha sido aceptado por muchos investigadores, pero los métodos de implementación difieren de un autor a otro. Muchos métodos envuelven el uso de las siguientes técnicas” (Maruvada, 2000).

- a) Aplicación de diferencias finitas a las ecuaciones de la línea.
- b) Representación de circuitos PI en cascada con elementos no lineales en paralelo.
- c) División de la línea en secciones lineales con elementos no lineales en

paralelo en cada unión.

2.9.1 REPRESENTACION DE CORONA PARA EL ANALISIS DE PROPAGACION DE ONDAS

“Una descripción muy común de corona es a través de las curvas $q - V$ (carga – voltaje). En la Fig. 2.16 se muestra una curva $q - V$ típica para un conductor cilíndrico colocado horizontalmente a una cierta altura sobre el plano de tierra. Cuando la tensión de la línea sobrepasa el valor de V_C , llamado tensión de inyección de corona, el aire alrededor del conductor se ioniza y por tanto almacena carga. Este es el fenómeno de corona cuyo efecto en la propagación de ondas es el incremento en la capacitancia de la línea, como se observa en la” Fig. 2.16 (Vázquez, 1998).

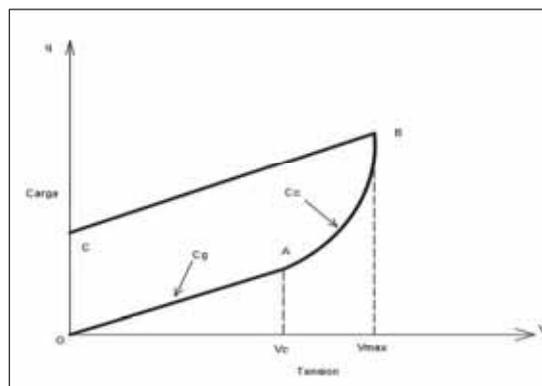


FIGURA 2 16.Curva $q - V$ (carga – voltaje).

“El segmento OA de la Fig. 2.16 corresponde a la sección lineal de la curva $q - V$, en la cual aún no se ha producido el efecto corona. A medida que la tensión se incrementa, la carga es proporcional a éste, siendo la constante de proporcionalidad en este segmento la capacitancia geométrica, C_g . El punto A se define como el punto de inyección de corona” (Vázquez, 1998).

“Cuando la tensión alcanza el punto A, la línea entra en corona manifestándose como el incremento continuo de la derivada de la carga respecto a la tensión, conocida como capacitancia de corona C_c . Lo anterior quiere decir que un incremento en la tensión conduce a un incremento en la capacitancia de corona; esto se manifiesta en la parte AB de la” Fig. 2.16 (Vázquez, 1998). “Finalmente,

cuando la tensión llega a su máximo valor que es el punto B y comienza a decrecer (BC) la carga tiene un comportamiento similar al de la parte OA. En el estudio de transitorios rápidos, de duración menor a un milisegundo, la pendiente de la parte BC suele considerarse igual a C_g , es decir igual a la pendiente de OA” (Vázquez, 1998).

La sección AB de la Fig. 2.16 es la parte de especial interés cuando se realizan estudios de propagación de ondas transitorias. Existe una gran variedad de modelos basados en las curvas $q - V$ que se pueden clasificar en tres tipos (Vázquez, 1998).

1. Modelos Piezolineales.
2. Modelos Parabólicos.
3. Modelos Dinámicos.

1) Modelos Piezolineales: Este tipo de modelos consiste en aproximar la parte no lineal (segmento AB) de la Fig. 2.16 mediante segmentos rectos.

2) Modelos Parabólicos: En el caso de los modelos parabólicos, el segmento no lineal AB de la curva $q - V$ se aproxima mediante una parábola generalizada, es decir, el exponente no necesariamente es dos. Un ejemplo de este tipo de modelos que fue propuesto por Gary, Cristescu y Dragan es el siguiente:

$$C_c = \begin{cases} C_g & V \leq V_c, & \frac{\partial v}{\partial t} > 0 \\ C_g n_1 \left(\frac{V}{V_c}\right)^{n-1} & V > V_c, & \frac{\partial v}{\partial t} > 0 \\ C_g & & \frac{\partial v}{\partial t} \leq 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

donde:

V_c es la tensión de inyección de corona y

n_1 es un parámetro que depende de la polaridad, el radio del conductor y del número de conductores en haz.

Las ecuaciones (2.11) representan la capacitancia de corona en el segmento AB de la Fig. 2.16. Cuando la tensión de la línea es menor a la tensión de inyección de corona, la capacitancia de corona C_c , es igual a la capacitancia geométrica C_g .

3) Modelos Dinámicos: En este tipo de modelos se considera que la carga no sólo depende de la tensión, sino también de la velocidad de cambio de dicha tensión, es decir, $C_c = f(v, \partial v / \partial t)$ (Vázquez, 1998).

2.10 GENERACION DE OZONO

“El ozono es un estado alotrópico del oxígeno, de fórmula O₃. Se produce permanentemente en forma natural, bajo la influencia de radiaciones ultravioletas emitidas por el sol, la descomposición de productos naturales de la tierra, etc.

El ozono es un oxidante muy activo y en concentraciones elevadas es tóxico para los seres vivos. Provoca un envejecimiento acelerado del tejido orgánico. Por esta razón, se especifica que, para el ser humano, la concentración máxima de ozono debe ser 10 partes por 100 millones para una Jornada de 8 horas” (Project, 1989).

“La concentración de ozono que se encuentra bajo las líneas de alta tensión es 20 veces inferior al admitido por normas. Aproximadamente 90 por ciento de los oxidantes son ozono, mientras que los 10 por ciento restantes se componen de óxidos de nitrógeno” (Project, 1989).

2.11 VIENTO IONICO

“Una de las consecuencias de las descargas por corona es la creación del viento iónico. Los iones creados por estas descargas son acelerados por el campo eléctrico. La velocidad se transfiere a las moléculas del gas por la colisión” (B.SC.A, 1993).

“Cuando se aplica un campo eléctrico a un gas, los electrones libres se desplazan en el sentido opuesto al campo aplicado. Entran en colisión elástica con las moléculas del gas y gracias a estas colisiones elásticas, se da la energía cinética y por lo tanto la velocidad de los electrones aumentan cuando la energía cinética de los electrones se vuelve importante, ella puede producir colisiones inelásticas con los átomos neutros del gas” (B.SC.A, 1993).

“Tras la colisión, el electrón es rápido y lleva la mayor parte de la energía cinética no consumida en la reacción. Esta posibilidad que tienen los electrones de acumular energía cinética entre varios choques conduce a una ionización por impacto entre electrones y moléculas en un campo eléctrico que tiene una intensidad relativamente baja” (B.SC.A, 1993).

2.12 RADIOINTERFERENCIA POR CORONA EN LINEAS DE TRANSMISION

“Las descargas corona dan origen a una serie de perturbaciones en una gama de frecuencias que incluye las bandas de radio frecuencia y ruido audible. Esto debido a la naturaleza pulsante del campo electromagnético generado en los alrededores de los conductores al darse las descargas, estos fenómenos se propagan tanto en el conductor como en el espacio, alcanzando niveles que podrían afectar la recepción de otras señales en cercanías de la LT” (Heredia-Rojas, 2003).

“Las líneas de transmisión de alta tensión tienen el propósito de transportar la energía eléctrica desde las centrales generadoras hasta los centros de consumo en condiciones óptimas de operación a una frecuencia nominal (50/60 Hz). En condiciones normales, las líneas producen emisiones electromagnéticas en un amplio rango de frecuencias las cuales pueden interferir con el funcionamiento normal de algunos dispositivos electromagnéticos localizados en la cercanía de las líneas, además de provocar un impacto físico y biológico en el ambiente” (Heredia-Rojas, 2003). “Generalmente, en las líneas de transmisión de alta tensión se presenta un fenómeno que propicia las emisiones electromagnéticas a altas frecuencias llamado efecto corona. Este efecto produce emisiones electromagnéticas primordialmente a frecuencias por debajo de los 3MHz e interfiere, entre otros dispositivos, con la recepción de radio en Amplitud Modulada (AM) en la banda de 0.535 a 1.605 MHz. Es por ello que las emisiones electromagnéticas debidas a corona suelen definirse como “radiointerferencia”, (RI) “ (Maruveda, 2000). Sin embargo, dados los avances en la tecnología en las últimas décadas, los problemas de compatibilidad electromagnética debidos a este fenómeno abarcan una gama de dispositivos de telecomunicación cada vez mayor.

“Las líneas de transmisión con corona son entonces fuentes sustanciales de interferencia electromagnética. Los factores que suelen ejercer influencia sobre el nivel de interferencia son, entre otros, la proximidad de la línea al receptor de la radiofrecuencia, la orientación de la antena receptora, la geometría utilizada en el esquema de transmisión y las condiciones climáticas” (Siegert, 1988).

“Si la frecuencia de la emisión electromagnética debida a corona en una línea de transmisión coincide con la frecuencia de la señal transmitida por un sistema de comunicación cercano a la misma, entonces la señal transmitida puede ser distorsionada. Para mitigar este efecto, el sistema de comunicación debe colocarse a una distancia

segura de la línea. Por esta razón es necesario estimar los niveles de radiointerferencia a diferentes distancias de la línea” (Siegert, 1988).

“En los estudios de compatibilidad electromagnética se utilizan diversas unidades de medición, tales como V/m para el campo eléctrico y A/m para el campo magnético. El rango numérico de estas cantidades puede ser bastante amplio; por ejemplo, los campos eléctricos pueden tener valores que van desde $1\mu\text{V/m}$ hasta 200 V/m , lo cual representa un rango del orden de 10^8 . Debido a este amplio rango de valores, las unidades de medición se suelen expresar en decibeles (dB). La ventaja de utilizar dB radica en que se logra comprimir la información disminuyendo los rangos de valores para facilitar su manipulación. El rango de valores mencionado de 10^8 correspondería a 160 dB. Debido a lo anterior, en este trabajo los perfiles de radiointerferencia de líneas de transmisión se representan en dB, como se mostrará en el capítulo IV” (Siegert, 1988).

2.13 DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA RI DEBIDA AL EFECTO CORONA.

“Generalmente, el efecto corona se presenta en puntos distribuidos aleatoriamente a lo largo de los conductores de la línea. El número de fuentes de corona depende en gran manera de las condiciones climáticas. Por ejemplo, para un buen clima (templado, sin lluvia) se generan unas cuantas fuentes de corona separadas por largas distancias. Por otro lado, bajo malas condiciones climáticas (lluvia, nieve), el número de fuentes de corona, así como la intensidad de las descargas será mucho mayor” (Maruvada, 2000).

“La descarga corona en cada punto de generación en el conductor se caracteriza por diferentes modos o tipos de corona. En general, los modos de streamer tipo *trichel* y de inyección son los primeros en ocurrir durante los semiciclos negativo y positivo de la onda de tensión, respectivamente. Estos dos modos de corona generan pulsos de corriente con tiempo de elevación rápido y corta duración” (Siegert, 1988).

“Los pulsos de corriente de corona negativos en general tienen tiempos de elevación más rápidos y duraciones más cortas que los pulsos positivos, mientras que las amplitudes de los pulsos positivos son regularmente mayores que las de pulsos negativos. Debido a lo anterior, los pulsos positivos se consideran como la fuente predominante de radiointerferencia, aunque los pulsos negativos pueden ser de importancia a mayores

frecuencias. En la Tabla 2.2 se muestran los rangos típicos de los parámetros principales de los pulsos corona positivo y negativo” (Maruvada, 2000).

TABLA 2.2. Parámetros típicos de los pulsos corona positivo y negativo.

Tipo de pulso	Amplitud (mA)	Tiempo de frente de onda (ns)	Duración (ns)	Tasa de repetición (pulsos/s)
Positivo	10 – 50	50	250	$10^3 - 5 \times 10^3$
Negativo	1 – 10	10	100	$10^4 - 10^5$

En el dominio del tiempo, pulsos similares a los de la Fig. 2.17 pueden representarse en términos de una doble exponencial de la forma:

$$i(t) = ki_p(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), \quad t \geq 0 \quad (2.12)$$

Donde:

i_p = amplitud de corriente en mA.

K, α , y β son constantes que definen la forma de onda particular, las cuales se obtienen empíricamente.

Como ejemplo, pulsos típicos generados por descargas corona positivas y negativas tienen las siguientes definiciones:

$$\text{Positivo} \rightarrow i(t) = 2.355i_p(e^{-0.01t} - e^{-0.0345t})$$

$$\text{Negativo} \rightarrow i(t) = 1.3i_p(e^{-0.019t} - e^{-0.285t})$$

con t dado en nanosegundos. En la Fig. 2.17 se muestran las formas de onda de los pulsos para corona positiva y negativa con i_p de 20 mA y 5 mA respectivamente.

Cada descarga corona se comporta como una fuente de corriente, la cual inyecta un tren de pulsos de naturaleza aleatoria al conductor. “Cada pulso de corriente inyectado se divide a su vez en 2 pulsos con la mitad de la amplitud del pulso original. Dichos pulsos viajan en direcciones opuestas a lo largo del conductor y van distorsionándose y atenuándose hasta que se vuelven insignificantes a una cierta distancia del punto de origen” (Maruvada, 2000).

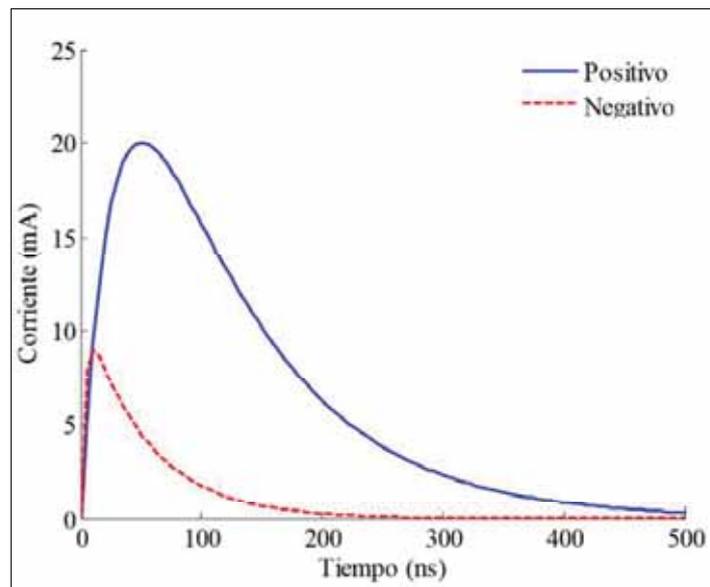


FIGURA 2 17. Pulsos de corriente de corona positivo y negativo.

“En consecuencia, la influencia de cada fuente de corona se observa sólo hasta una cierta distancia, la cual depende de las características de atenuación de la línea. De esta manera, la corriente circulante resultante en cualquier punto de la línea, estará formada por los pulsos producidos por las fuentes de corona distribuidas a lo largo del conductor, con amplitudes y espaciamiento en tiempo variando de forma aleatoria, viajando en los dos sentidos de la línea. Aunado a lo anterior, una fuente de corona en uno de los conductores de una línea multiconductora induce pulsos de corriente en todos los demás conductores” (Maruvada, 2000).

2.14 EL CONCEPTO DE FUNCIÓN DE EXCITACIÓN.

El nivel de radiointerferencia en la vecindad de una línea de transmisión depende esencialmente de 2 factores:

1. La generación de corona en los conductores.
2. La propagación de las corrientes debidas a corona a través de la línea.

“Desde los puntos de vista tanto teóricos como prácticos es de utilidad caracterizar la generación de corona por una cantidad que considere la naturaleza aleatoria y pulsante de las corrientes de corona” (Gary, 1971). “También es importante que dicha cantidad dependa solamente de la carga espacial y la distribución de campo eléctrico

cercano al conductor, y no así de la configuración de la línea. Gary propuso una cantidad de este tipo a través del concepto de *función de excitación*” (M. R. Moreau, 1971).

“Para un conductor sencillo (cilíndrico) localizado horizontalmente sobre el suelo, el movimiento de una carga φ generada por corona induce una corriente en el conductor. La corriente inducida puede calcularse empleando el teorema de Shockley – Ramo de la siguiente forma” (Maruvada, 2000):

(2.13)

$$J = \frac{C\varphi}{2\pi\epsilon_0 d_r} V_r$$

Donde

J = Corriente inducida de corona.

C = Capacitancia p.u.l.

φ = carga generada por corona.

d_r = distancia radial del punto donde la carga φ está localizada.

V_r = velocidad radial de la carga espacial.

La ecuación (2.13) puede reescribirse como:

(2.14)

$$J = \frac{C}{2\pi\epsilon_0} \Gamma$$

Donde Γ es la función de excitación, dada por:

(2.15)

$$\Gamma = \frac{\varphi}{d_r} V_r$$

De (2.14) y (2.15) puede observarse que el término Γ es función únicamente del movimiento de carga espacial cercana al conductor y que la corriente inducida en el conductor puede considerarse dependiente de dos factores:

1. La capacitancia del conductor, la cual depende básicamente de su configuración geométrica (Maruvada, 2000).
2. La densidad y movimiento de carga espacial cercana al conductor, la cual depende solamente de la distribución de campo eléctrico en la vecindad del conductor (Maruvada, 2000).

“En el contexto de radio interferencia J representa los trenes de pulsos de corriente (aleatorios) inducidos en el conductor o, en el dominio de la frecuencia, el valor rms de la corriente a una frecuencia dada. La principal ventaja del concepto de función de excitación es que es completamente independiente de la geometría del conductor. Por lo tanto, Γ puede medirse en una geometría simple y después emplearse para predecir el desempeño de RI en una configuración práctica de línea de transmisión” (Maruvada, 2000).

“El nivel de RI depende de un buen número de parámetros; algunos están relacionados con la geometría de la línea como son: dimensiones de la línea, su posición en el espacio y la intensidad de campo eléctrico en la superficie de los conductores. No obstante, otros parámetros dependen del medio ambiente, por ejemplo, el estado en la superficie de los conductores y condiciones climáticas. La estimación de estos últimos parámetros es más complicada y debido a su existencia, el nivel de radiointerferencia en clima seco es inestable y fluctuante. Estas fluctuaciones combinadas con otras debidas a la variación de la tensión en las líneas, hacen muy difícil determinar exactamente los niveles de RI. Por lo anterior, la determinación de radiointerferencia en ambiente seco se realiza generalmente a través de estudios estadísticos” (Gary, 1971).

“Por otro lado, bajo condiciones de lluvia densa, el nivel de radiointerferencia se mantiene más estable. Esta propiedad nos permite considerar el valor de radiointerferencia bajo lluvia densa como el valor característico de una línea. Además, este valor constituye en la práctica el máximo nivel de RI que la línea puede generar” (Gary, 1971). Por esta razón, varios grupos de investigación han derivado fórmulas empíricas para la función de excitación, basadas en un buen número de datos experimentales obtenidos en estudios desarrollados bajo condiciones de lluvia densa (1 a 20 mm/hr) (Gary, 1971).

“En 1992, Olsen y Schennum realizaron una comparación de algunos métodos para calcular los niveles de RI, y optimizaron las fórmulas para la función de excitación por medio de la adición de una constante para minimizar las diferencias entre cada una de ellas” (R. G. Olsen, 1992). En la Tabla 2.3 se presentan algunas de las fórmulas para la función de excitación, dada en dB sobre $1\mu A/m$

Donde:

d es el diámetro del conductor en cm y gm es el gradiente máximo en kV/cm (valor ms).

TABLA 2 3.” Fórmulas empíricas para el cálculo de la función de excitación”. (R. G. Olsen, 1992)

CIGRÉ (lluvia densa)	$\Gamma = -40.69 + 3.5 g_m + 6d$
BPA (ambiente desfavorable, estable)	$\Gamma = 37.02 + 120 \log(\text{gm}/15) + 40 \log(d/4)$
IREQ (lluvia densa)	$\Gamma = -93.03 + 92.42 \log(\text{gm}) + 43.02 \log(d)$
EPRI (lluvia densa)	$\Gamma = 76.62 - (580/\text{gm}) + \log(d/3.8)$

2.15 ESTIMACIÓN DE LA RI.

“La determinación del nivel de radiointerferencia es un parámetro de consideración en el diseño de líneas de alta tensión” (LaForest, 1981). “Sin embargo, existen variaciones en los criterios y métodos de cálculo de RI” (M. R. Moreau, 1971), “Las normas más utilizadas en la medición de interferencia electromagnética son la NEMA y la CISPR de la IEC” (Rodríguez, 1972), (F. Kiessling, 2003). “A continuación se consideran algunos aspectos que de alguna u otra forma influyen en la determinación de la RI” (Siegert, 1988).

2.15.1 CONDICIONES CLIMATICAS

“Para tomar en consideración adecuadamente la influencia de las condiciones climáticas en la generación de radiointerferencia, generalmente se realiza una medición y observación minuciosa de las fluctuaciones del clima durante un periodo de tiempo considerable (cuando menos un año). Los resultados obtenidos en algunos países, elaborados con base en histogramas, no pueden ser trasladados a otros con condiciones climáticas diferentes” (Siegert, 1988). Los parámetros que suelen afectar estas observaciones son los siguientes:

Variación de la tensión de la línea.

“Las condiciones meteorológicas pueden variar en un tramo de varias decenas de

kilómetros. Un tramo de tal extensión contribuye en forma integral a la formación del nivel de RI” (Siegert, 1988).

“La superficie de los conductores de la línea se ve expuesta a una serie de factores, tanto de origen climático (nieve, hielo, rocío, etc.) como de naturaleza diversa (polvo, insectos, etc.)” (Siegert, 1988).

“A fin de facilitar el análisis, se han establecido algunos patrones de referencia. En el caso de la RI se han establecido dos patrones extremos: lluvia densa (heavy rain) y buen tiempo (fair weather). El nivel más alto de RI se observa usualmente durante lluvia densa (1 mm/hora) o nieve” (Gary, 1971).

2.15.2 ESPECTRO DE FRECUENCIAS

“El espectro de frecuencias suministra la variación de la RI en función de la frecuencia hasta unos 10 MHz. La frecuencia de medición estipulada por NEMA es de 1 MHz, mientras que CISPR exige 500 kHz”, (Rodríguez, 1972), “El espectro de frecuencias denota cierta dependencia de la polaridad de la descarga. Por ejemplo, en el rango de AM la descarga positiva ejerce un papel predominante, mientras que la descarga negativa tiene mayor influencia en la transmisión de radio a frecuencia modulada (FM) y de video (TV)” (Rodríguez, 1972). Otro aspecto de consideración es la atenuación de la propagación, que aumenta con la frecuencia, modificando el espectro de impulsos y reduciendo el ruido generado.

2.15.3 GEOMETRIA DEL CONDUCTOR

“La mayoría de las líneas de alta tensión se caracterizan por utilizar conductores en haz. El número de subconductores por fase, el radio de cada uno de ellos y el radio del haz ejercen gran influencia sobre el nivel de RI y perfil lateral de la línea en estudio. Aunque aumentando el número de subconductores por fase disminuyen los efectos de la descarga corona, y por lo tanto también de RI, el comportamiento de la línea ante oscilaciones, carga de hielo, etc. puede empeorar” (Siegert, 1988).

2.15.4 PERFIL LATERAL DE LA RADIOINTERFERENCIA (RI)

“En la práctica es de gran importancia el conocimiento de la radiointerferencia a cierta distancia de la línea, lo que se suele denominar perfil lateral. El perfil se mide a una altura de 2 m sobre el nivel del suelo, aunque en algunos trabajos se calcula a nivel del suelo, hasta una distancia máxima de 200 m del conductor” (LaForest, 1981). “Lógicamente los niveles de RI van disminuyendo conforme la distancia a la línea aumente. Por otro lado, es importante eliminar cualquier fuente de perturbación, así como tomar en consideración la proximidad a subestaciones, torres de alta tensión y cualquier variación brusca de terreno” (M. R. Moreau, 1971).

2.16 MEDICIÓN DE LA RI.

“A fin de conocer si los niveles de radiointerferencia que genera una línea de transmisión son aceptables o afectan a dispositivos de comunicación en su vecindad, es necesario expresar el nivel de interferencia en términos cuantitativos, lo cual implica el uso de instrumentos de medición” (LaForest, 1981).

“En general, los instrumentos utilizados en la medición de radiointerferencia ocasionada por líneas de transmisión constan de una antena acoplada a un detector de radio, el cual cubre el rango de la interferencia en cuestión. Con el objetivo de obtener un acoplamiento adecuado entre la terminación de la antena y la impedancia de medición contenida en el detector, se recurre en la práctica a acoplamientos especiales” (LaForest, 1981).

“Para la medición de la radiointerferencia generada por líneas de transmisión se deben tomar en consideración aspectos como la localización de la medición, la calibración de los instrumentos y otras fuentes de ruido cercanas a la línea” (LaForest, 1981).

2.16.1 EL MEDIDOR DE RADIOINTERFERENCIA

“Los instrumentos utilizados en las mediciones de radiointerferencia, deben simular idealmente el dispositivo electromagnético que está siendo interferido. En la Fig. 2.18 se muestra un diagrama a bloques de un medidor de radiointerferencia. Básicamente, el medidor consiste de un receptor de radio de alta calidad, la señal detectada que

es procesada a través de varios bloques y un indicador de la medición” (LaForest, 1981). “El receptor de radio es la parte del instrumento que es considerado como un filtro pasa banda con una ganancia constante para todas las frecuencias. El detector es un circuito rectificador que extrae los componentes de alta frecuencia de la señal de radio frecuencia modulada por el receptor” (Maruvada, 2000).

“Los diferentes bloques por donde pasa la señal son diseñados de tal forma que se midan los valores pico, cuasi-pico (CP), promedio o valor rms de la salida del detector. Además de la indicación de radiointerferencia medida, estos instrumentos también proveen salidas de audio y otras salidas eléctricas a diferentes etapas del circuito. Utilizando antenas apropiadas el medidor de radiointerferencia puede ser utilizado con un voltímetro, amperímetro o medidor de intensidades de campos. Los instrumentos de medición modernos también cuentan con opciones de control por medio de computadoras y sistemas de adquisición de datos” (Maruvada, 2000). “En el rango de frecuencias de 0.15 a 30 MHz, el cual abarca la banda de frecuencias de recepción de radio en Amplitud Modulada (AM), las mediciones de radiointerferencia generalmente se realizan utilizando una impedancia de conexión compuesta por una capacitancia de alta tensión en serie con un resistor entre el conductor y tierra, midiéndose la caída de tensión en un resistor de 50Ω . Lo anterior también es comúnmente conocido como medición de voltaje de radiointerferencia (radio interference voltage, RIV). La corriente de interferencia puede ser obtenida fácilmente a partir del RIV medido” (Maruvada, 2000).

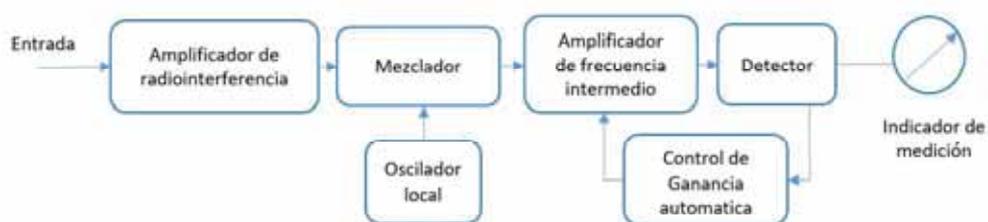


FIGURA 2 18. “Diagrama a bloques de un medidor de radiointerferencia”. (Maruvada, 2000)

2.16.2 SISTEMAS DE ANTENA

“Para medir los campos de interferencia, se utilizan antenas que son colocadas dentro del campo que se desea medir. Las antenas de varilla (rod antennas) son usadas para medir las componentes de campo eléctrico del campo de radiointerferencia electromagnética, mientras que las antenas de cuadro (loop antennas) son utilizadas para la medición de las componentes de campo magnético” (Maruvada, 2000).

“La salida de tensión de la antena es proporcional a la intensidad del campo; el factor de antena relaciona ambas cantidades. Generalmente se tiene una impedancia considerable entre la antena y el medidor, pero se requiere un buen acoplamiento entre estos elementos para lograr obtener mejores lecturas a la frecuencia de medición o en un amplio rango de frecuencias. El acoplamiento de la antena se obtiene en la forma de su construcción, y usualmente los fabricantes proveen curvas del factor de antena el cual incluye el acoplamiento. Cuando la antena es utilizada conforme a las instrucciones del fabricante, El campo de interferencia E está dado por” (LaForest, 1981):

(2.16)

$$E = V_L + AF \text{ dB}/1\mu\text{V}/\text{m}$$

donde:

V_L es la lectura de medición en dB sobre $1\mu\text{V}/\text{m}$ y

AF es el factor de antena en dB sobre 1m^{-1} .

“Debido a que existen diferentes tipos de antena, se tiene que considerar el tipo de ruido que se desea medir y la frecuencia de medición para seleccionar la antena adecuada. Las mediciones de RI en AM pueden realizarse con antenas verticales o en forma de lazo; para el caso de interferencia en la transmisión de señales de video (TVI), se recurre al uso de dipolos (150 a 200 MHz). En vista de que por encima de los 200 MHz se reduce drásticamente la sensibilidad de los dipolos, es necesario utilizar antenas bicónicas para frecuencias mayores a esta frecuencia” (Siegert, 1988).

2.17 INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA EN CORRIENTE DIRECTA.

“Mientras que en los sistemas de CA se tienen los efectos de cada polaridad en cada uno de los conductores, en CD un conductor siempre se expone a una descarga positiva o negativa, mientras que el otro a la descarga opuesta. La excitación del fenómeno obedece a un incremento del gradiente eléctrico por encima de cierto valor crítico, al cual se ha definido como inceptión del fenómeno” (Siegert, 1988).

“Al igual que en CA, las descargas positivas contribuyen sustancialmente en la generación de interferencia, pues las negativas suelen tener una contribución insignificante. Esto quiere decir que en CD sólo el polo positivo genera radiointerferencia” (Siegert, 1988).

2.18 EFECTO SKIN

“En corriente continua, la densidad de corriente es similar en todo el conductor, pero en la corriente alterna se observa que hay una mayor densidad de corriente en la superficie que en el centro Fig 2.19 (Siegert, 1988).

El efecto pelicular se deba a la variación del campo magnético, es mayor en el centro, lo que da lugar a una reactancia inductiva mayor y debido a ello a una intensidad menor en el centro del conductor y mayor en la periferia” (Siegert, 1988).

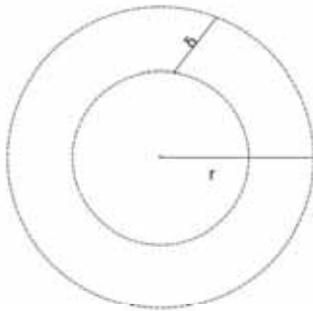


Fig 2.19 Efecto skin

En un conductor

Se define la profundidad superficial del conductor “ δ ”

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_c}{j\omega\mu_c}} \quad (\text{m}) \quad (2.17)$$

ρ_c = resistividad del conductor

μ_c = permeabilidad magnética del conductor

La resistencia de corriente continua se calcula

$$R_{CD} = \frac{\rho_c}{A} = \frac{\rho_c}{\pi r^2} \quad (2.18)$$

La impedancia a altas frecuencias se calcula

$$Z_{hf} = \frac{\rho_c}{2\pi r\delta} \quad (2.19)$$

El área donde fluyen los electrones

$$A = 2\pi r\delta - \pi\delta^2 \quad (2.20)$$

Para altas frecuencias se elimina ($\pi\delta^2$) porque $r \gg \delta$

La impedancia del conductor:

$$Z_c = \sqrt{R_{CD}^2 + Z_{hf}^2} \quad (2.21)$$

CAPITULO III

IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS ELECTRICOS DEL TRAMO QUENCORO-TINTAYA

3.1 GENERALIDADES

El presente capítulo describe la identificación de los parámetros eléctricos del tramo Quencoro – Tintaya tomando datos de la empresa concesionaria que brinda el servicio de suministro de energía eléctrica, donde se define la ruta de línea presentada, dicha ruta ha sido actualizada en base al análisis de fotografías satelitales actualizadas al año 2011, cartas geográficas del IGN y el reconocimiento en campo de la zona.

3.2 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL SISTEMA

La línea en 138 kV Quencoro - Tintaya, toma como punto de alimentación la S.E. Quencoro y presenta las siguientes características técnicas:

Tramo	: S.E. Quencoro – S.E. Tintaya
Tensión nominal del sistema	: 138 kV
Tensión máxima del sistema	: 145 kV
Voltaje de sostenimiento de maniobra:	: 750 kV
Voltaje de sostenimiento al impulso atmosférico	: 1050 kV
Frecuencia	: 60Hz
Configuración	: 3φ con cable de guarda
Factor de Potencia	: 0,85
Conexión del Neutro	: Aterrado

3.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA LÍNEA

Las características principales de las líneas de transmisión se detallan en el cuadro siguiente:

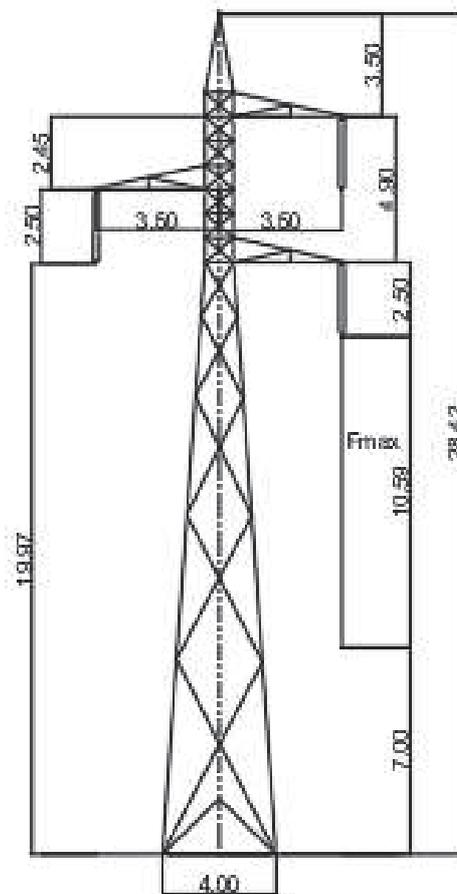
TABLA 3 1.Características Generales

Empresa	REP del Perú S.A.
Equipo	Línea de transmisión
Ubicación	Quencoro - Tintaya
Tipo	ACSR 319 mm ²
Armado	Triangular

TABLA 3 2.Características específicas

Características mecánicas de los cables de energía

Descripción	Tipo	Cantidad	Unidad
Distancia horizontal de fase A a la estructura	Dae	3.5	m
Distancia horizontal de fase B a la estructura	Dae	3.5	m
Distancia horizontal de fase C a la estructura	Dae	3.5	m
Distancia vertical de medio vano al terreno fase inferior	Dae	7	m



PRESTACION
 VANO MAXIMO: 600 m
 VANO MEDIO: 360 m
 VANO PESO: 1050 m
 ANGULO: 5°
 CONDUCTORES ACSR 319 mm²
 CABLE DE GUARDA AoGo 36.36 mm²

F138 KV - SIMPLE TERNA - SIERRA RURAL - AREA DE CARGA AO
 TORRE METALICA - 1 CABLE DE GUARDA

FIGURA 3 1. Torre metálica. 1 Cable de guarda

TABLA 3 3 Características mecánicas del cable de guarda

Descripción	Tipo	Cantidad	Unidad
Sección	Acero Galvanizado EHS	3/8	plg
Distancia vertical terreno	Dgg	28.5	m
Distancia vertical de medio vano al terreno	Dgg	25	m

Tabla 3 4 Características adicionales

Descripción	Tipo	Material	Norma
Estructuras	Torres	Metálicas	
Aisladores	Suspensión	Porcelana	ANSI 52-3
Aisladores	Anclaje	Porcelana	ANSI 52-3
Aisladores	Angulo	Porcelana	ANSI 52-3
Puesta a tierra	Contrapeso	Cable coperwelld 2 AWG	

Tabla 3 5. Características eléctricas de los cables de energía

Descripción		Cantidad	Unidad
Tensión nominal	V	138	kV
Número de circuitos		1	
Número de conductores por fase		1	
Disposición	Triangular		
Longitud de la línea	L	187	Km
Sección real del conductor	S	319	mm ²
Radio del conductor	R	10.079	mm
Frecuencia	F	60	Hz
Resistividad del conductor a 25°C	P	0.0028834	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
Coefficiente de temperatura	A	0.00395	
Factor constante de secuencia cero	Fxo	0.00289	
Resistividad promedio del terreno	Rp	923.864571	$\Omega \cdot \text{m}$
Factor de corrección por número de hilos (19)		0.758	

3.4 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPAMIENTO

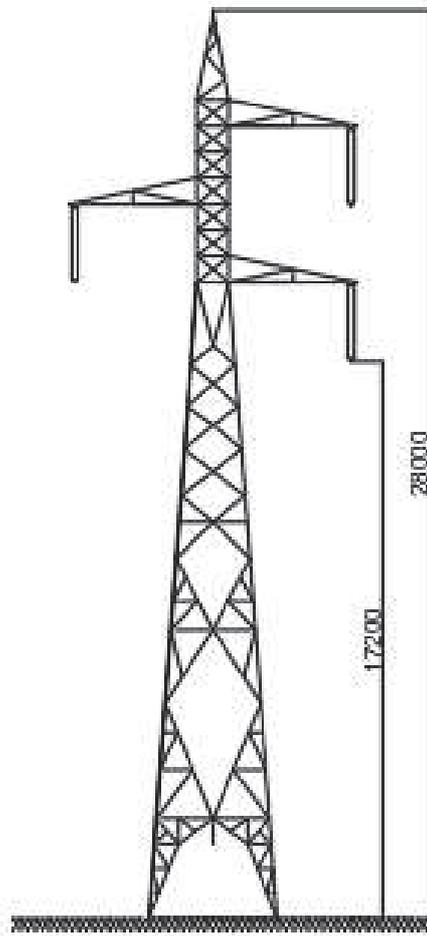
A continuación, se detallan las características principales de las líneas de transmisión.

3.4.1 ESTRUCTURAS METÁLICAS.

Se ha previsto la utilización de estructuras metálicas, en la que los materiales que se utilizarán en la fabricación de las torres son perfiles angulares y placas de acero estructural de alta resistencia; las torres serán del tipo auto soportados, formadas con perfiles angulares de acero galvanizado, ensamblados. En la línea se usan torres metálicas de los tipos S, A y T.

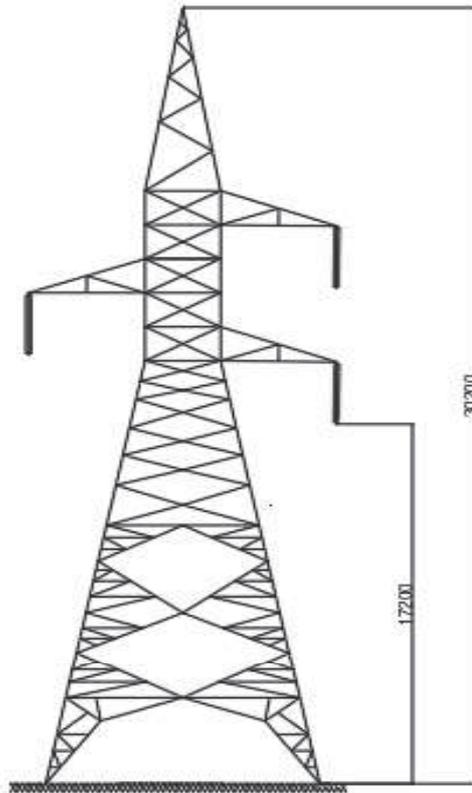
TABLA 3 6 Funcion de las torres de las torres metalicas.

TIPO	S	A	T
FUNCIÓN	SUSPENSIÓN	ANGULAR- ANCLAJE/ ESPECIAL	ANGULAR/ ANGULAR/ ESPECIAL
ÁNGULO DE LA	0 -3°	≤30°/0°	90°/130°/0°



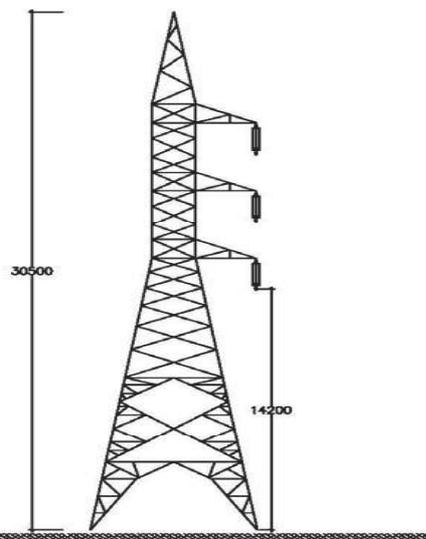
ESTRUCTURA TIPO S

FIGURA 3 2.Estructura de tipo S, es una estructura de Alineamiento



ESTRUCTURA TIPO A

FIGURA 3 3.Estructura de tipo A, es una estructura de Anclaje.



ESTRUCTURA TIPO T

FIGURA 3 4.Estructura de tipo T, es una estructura de Angulo.

3.4.2 CONDUCTORES

Los conductores a utilizar son de aleación de aluminio con alma de acero ACSR 319mm² en 138 kV; la sección de los conductores fue definida tomando en consideración los siguientes aspectos:

- Corrientes de cortocircuito.
- Esfuerzos mecánicos.
- Capacidad de corriente en régimen normal.
- Regulación de tensión.

Nivel de Pérdidas.

Los accesorios de los conductores que se utilizan son: amortiguadores de vibración tipo stockbridge.

3.4.3 CABLE DE GUARDA

Los cables de guarda considerado para el proyecto, son de acero EHS de 38 mm².

La selección de los cables de guarda se ha hecho en base a los siguientes aspectos:

- Corrientes de cortocircuito.
- Esfuerzos mecánicos.

3.4.4 AISLADORES

La línea de transmisión, lleva aisladores clase ANSI 52-3, con cadenas de 6 aisladores para suspensión y 10 para anclaje en el caso de la línea a lo largo de todo su recorrido.

El conductor se fija a la cadena de aisladores a través de ensambles de suspensión, anclaje según sea el caso.

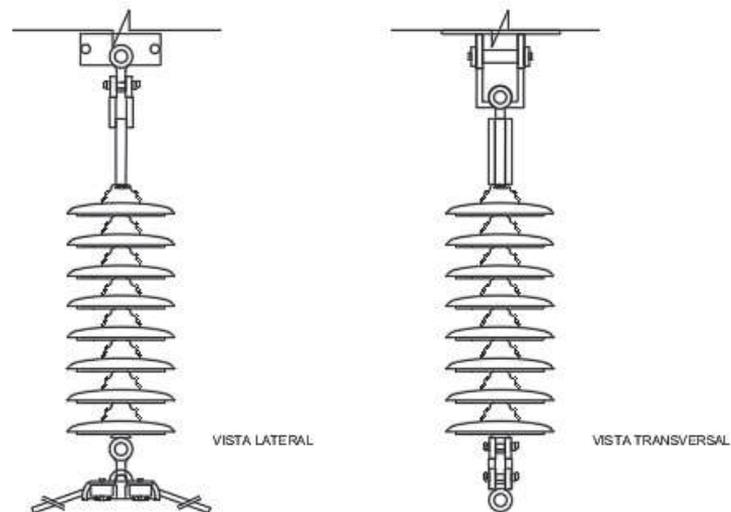


FIGURA 3 5. Detalle Ensamblaje cadena de aisladores clase ANSI 52-3.

3.4.5 PUESTA A TIERRA

Los sistemas de puesta a tierra definidos son de 4 tipos como se describe:

- a) **Sistema A:** Este sistema de PT está conformado por 2 contrapesos instalados en forma lineal separados a distancia horizontal de 1,5m y tendidos a lo largo del eje de la línea, separados a distancia horizontal entre conductores de 1,5m, y unidas entre sí mediante conductor de cobre recocido de 2 AWG.
- b) **Sistema B:** Este sistema de PT está conformado por 4 contrapesos instalados en forma circular a lo largo del eje de la línea, separados a una distancia horizontal entre conductores de 1,5m, y unidas entre sí mediante conductor de cobre recocido de 2 AWG.
- c) **Sistema C:** Este sistema de PT está conformado por 2 varillas copperweld instalados en forma lineal separados a distancia de 1,5m a lo largo del eje de la línea y 2 contrapesos unidos a las varillas, separados a distancia horizontal entre conductores de 1,5m, y unidas entre sí mediante conductor de cobre recocido de 2 AWG.

d) Sistema D: Este sistema de PT está conformado por 4 varillas copperweld instalados en forma circular a lo largo del eje de la línea, separados a distancia horizontal entre conductores de 1,5m, y unidas entre sí mediante conductor de cobre recocido de 2 AWG.

Todas las estructuras sin excepción llevarán puestas a tierra.

3.4.6 PARARRAYOS

Los pararrayos son de óxido de Zinc (ZnO), sin explosores, cumplen los requerimientos estipulados en la norma IEC 60099-4 y la publicación IEC 61264; los pararrayos se conectan entre fase y tierra.

El criterio para la selección de los pararrayos es dar mayor confiabilidad a la línea en presencia de descargas directas. Se ha colocado un juego de pararrayos en la salida de la S.E. de Quencoro y a la llegada a la S.E de Tintaya.

3.4.7 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Se utiliza el sistema convencional, malla de tierra profunda, construida con conductores de 120mm² de cobre enterrados a una profundidad de 0,8m jabalinas, empalmes mediante soldadura exotérmica; la red de tierra profunda (conexión a equipos) se hará con conductores de 35 mm².

3.5 CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS

Tomando en consideración los datos de los cuadros precedentes se calcularán:

3.5.1 RESISTENCIA ELECTRICA

Resistencia unitaria

$$\frac{R}{L} = \frac{\rho}{s}$$

$$R_{25} = 0.053456 \Omega/\text{km}$$

Resistencia corregida a 50°C

$$R = R_{25} [1 + \alpha(t - 25)]$$

Resistencia de secuencia positiva (+) R_k

$$R_{50} = 0.05867 \text{ } \Omega/\text{km}$$

3.5.2 REACTANCIA INDUCTIVA

Cálculos preliminares

L_k = coeficiente de autoinducción.

$$L_k = \left[0.5 + 4.6 * \log \left(\frac{DMG}{r_{eq}} \right) \right] * 10^{-4} \quad \text{H/km}$$

DMG = Distancia media geométrica.

$r = r_{eq}$ = radio del conductor (fase simple)

$$DMG = \sqrt[3]{D_{ab} * D_{bc} * D_{ac}}$$

$$D_{ab} = 14.425 \text{ m.}$$

$$D_{bc} = 12.000 \text{ m.}$$

$$D_{ac} = 8.000 \text{ m.}$$

$$\mathbf{DMG} = 11.144968 \text{ m.}$$

de donde:

$$L_k = 0.06281 \text{ H/km.}$$

Velocidad angular

$$\omega = 2\pi f$$

y

$$f = 60 \text{ Hz.}$$

La reactancia inductiva de secuencia positiva es

$$X_k = \omega L_k$$

$$\mathbf{X_k} = 0.3945 \text{ } \Omega/\text{km}$$

3.5.3 IMPEDANCIA SERIE UNITARIA

Módulo $Z_k = \sqrt{R_k + X_k}$

Ángulo $\phi = \text{tag}^{-1} \left(\frac{X_k}{R_k} \right)$

$Z_k = 0.3945 \Omega/\text{km}$

$\Phi_k = 82.29^\circ$

3.4.4 IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO

Resistencia eléctrica (R_o)

$$R_o = R_{25^\circ} + 0.002864 * f$$

$R_o = 0.2252 \Omega/\text{km}$

Reactancia inductiva (X_o)

$$X_o = f_{x_o} * f * \log \left(\frac{De^3}{D_s * DMG^2} \right)$$

De= distancia equivalente de la imagen

$$De = 658 * 1000 * \sqrt{\frac{rp}{f}}$$

$De = 25.8198 \text{ m.}$

Radio medio geométrico equivalente del conductor (D_s)

$$D_s = 0.7788 * r$$

$D_s = 3.960550 \text{ mm.}$

DMG'= distancia media geométrica equivalente

$$DMG' = \sqrt[3]{D_{ag} * D_{bg} * D_{cg}}$$

$D_{ag} = 7.81 \text{ m.}$

$D_{bg} = 14.31 \text{ m.}$

$D_{cg} = 14.31 \text{ m.}$

$DMG' = 11694.368296 \text{ mm.}$

Reactancia de secuencia cero (X_o)

$$\mathbf{X}_0 = 1.821074 \, \Omega/\text{km}.$$

Impedancia de secuencia cero

módulo

$$\mathbf{Z}_0 = 1.89902359 \, \Omega/\text{km}$$

ángulo

$$\Phi_0 = 73.52^\circ$$

3.5.5 IMPEDANCIA PARALELA UNITARIA

Capacidad

$$C_k = \left[\frac{24.2}{\log \frac{DMG}{r}} \right] * 10^{-9}$$

$$C_k = 4.231E-09 \, \text{F/km}.$$

Suceptancia

$$B_k = 2 * \pi * f * C_k$$

$$B_k = 4.231E-06 \, \text{s/km}.$$

Admitancia (Y_k)

Módulo $Y_k = B_k$

$$Y_k = 4.231E-06 \, \text{s/km}$$

ángulo

$$\Phi_{y_k} = 90.00^\circ$$

3.5.6 IMPEDANCIA CARACTERISTICA

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_k}{Y_k}}$$

$$Z_c = 305.3861 \, \Omega$$

ángulo

$$\Phi_c = -7.71^\circ$$

3.5.7 POTENCIA NATURAL

$$P_n = \frac{V_n^2}{Z_c}$$

P_n=62.3604 MVA.

3.6 PERDIDAS POR CORONA

En base a las características climáticas de la zona se tiene dos indicadores de pérdidas por corona, sin y con lluvia, los resultados fueron obtenidos del EPRI – APPLET CL-1 (Transmision Corona able de guarda, correccipLoss) en base al método BPA (Bonneville Power Administration) que se aplica para nuestro caso(1 conductor por fase, cable de guarda, corrección por altura y por lluvia).Las consideraciones para el cálculo fueron en base a los datos de Senamhi y son las siguientes:

TABLA 3 7.Porcentaje de lluvias

Tipo de clima	%
Clima sin lluvia	65
Clima con lluvia	30
Lluvia fuerte	25
Lluvia media	50
Garua	25
Clima con nieve	5
Fuerte nieve	20
Nieve media	30
Nieve ligera	40
Granizo	10
Total	100
Precipitaciones	2.9 mm/h

Los resultados de las pérdidas por corona son los siguientes:

TABLA 3 8.Perdidas por corona

Conductor	Sin lluvia	Con lluvia
	kW/km	kW/km
ACSR	1.8	5.4

TABLA 3 9.Perdidas por corona en porcentaje

Conductor	Pérd. Joule kW/km	Pérdidas de potencia %
ACSR	23.1	3

3.7 DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE

$$\delta = \frac{3.921 h}{T+273}$$

$$\log h = \log 76 - \frac{Y}{18336}$$

Donde:

Y = 3500 m

T = 15 °C

$$\delta = 0.6667$$

CAPÍTULO IV

MÉTODO DE PREDICCIÓN DE PERFILES DE RADIOINTERFERENCIA

4.1 INTRODUCCION

En este capítulo se utilizará el método basado en (Moreau, 1971), que fue a su vez ampliado por (Tejada, 2008) quien incluyó dos mejoras con el fin de obtener una mayor precisión en el cálculo de perfiles de RI: el empleo de descomposición modal para desacoplar el sistema multiconductor y la inclusión del efecto skin existente en el propio conductor y en el retorno por tierra, para las altas frecuencias en que se desarrolla el fenómeno de corona. Nosotros no implementaremos modificaciones adicionales a esta metodología, sólo introduciremos las características de la línea Quenqoro-Tintaya desarrolladas en el capítulo 3. Los resultados obtenidos son comparados con mediciones experimentales publicadas previamente por otros autores.

4.2 ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE CORONA Y CÁLCULO DE RI.

“El propósito del análisis de propagación es determinar las corrientes y tensiones en diferentes puntos a lo largo de la línea de transmisión relacionados con la generación de corona en los conductores, para finalmente calcular la intensidad de los campos eléctrico y magnético resultantes en la vecindad de la línea. A continuación, se describen los métodos de cálculo para línea monofásica y multiconductora”. (Tejada Martinez, 2008)

4.2.1 LINEA MONOFASICA

“Se considera una línea de transmisión monofásica de longitud infinita con inyección de corriente por corona distribuida uniformemente por unidad de longitud y denotada por J . Para una longitud elemental de la línea puede emplearse el circuito mostrado en la Fig. 4.1. A partir de dicho circuito pueden

obtenerse las siguientes ecuaciones”. (Tejada Martinez, 2008)

$$-\frac{dV}{dz} = ZI \quad (4.1)$$

$$-\frac{dY}{dz} = YV - J \quad (4.2)$$

“Los parámetros Z e Y son la impedancia serie y la admitancia en derivación por unidad de longitud de la línea, respectivamente, calculados a la misma frecuencia. Estos parámetros se obtienen a partir de la formulación descrita”. (Y.Nakano, 1990) la cual considera el efecto “skin” en conductores y en plano de tierra. “Dado que la fuente de inyección de corona tiene la forma de un tren de pulsos, el valor de J , y en consecuencia de I y V , están dados en rms a una cierta frecuencia”. (Maruvada, 2000) . También se tiene:

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta \quad (4.3)$$

donde:

γ = constante de propagación.

α = constante de atenuación.

β = constante de fase.

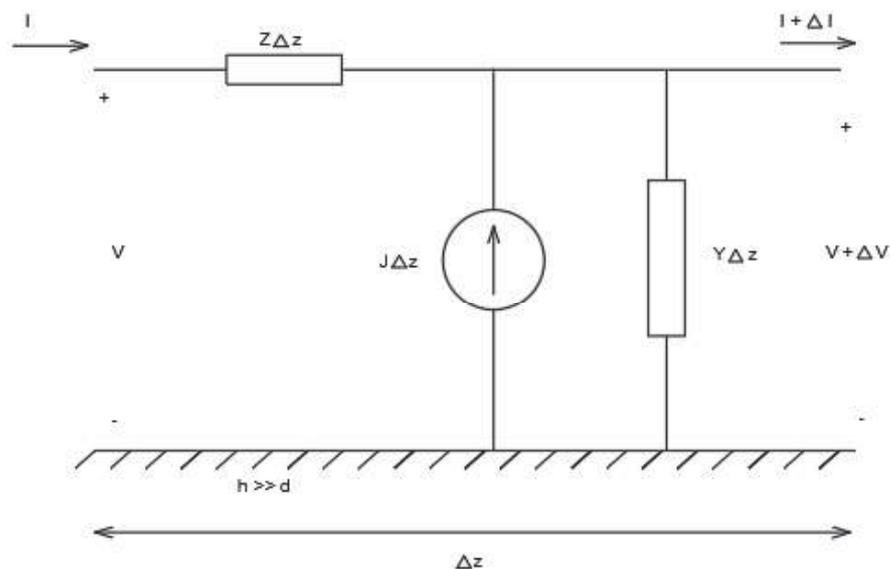


FIGURA 4 1. Circuito por unidad de longitud de una línea aérea con inyecciones de corriente por corona.

“A diferencia del método propuesto por Gary en el cual las constantes de atenuación son presentadas como valores promedio para línea horizontal o en configuración triangular, en este método se obtienen a partir de (4.3)” (M. R. Moreau, 1971). “La constante de atenuación α tiene unidades de Nepers por metro (Np/m), mientras que la constante de fase β tiene unidades de radianes por metro (rad/m). Cuando la corriente J es inyectada en un punto la línea de transmisión, ésta se divide y propaga igualmente en ambas direcciones. Por consiguiente, la corriente inducida I está dada por”. (Tejada Martinez, 2008)

$$I = \frac{J}{2\sqrt{\alpha}} \quad (4.4)$$

donde la inyección de corriente por corona se obtiene con:

$$J = \frac{C}{2\pi\epsilon_0} \Gamma \quad (4.5)$$

“La función de excitación Γ se obtiene mediante alguna de las fórmulas empíricas de la Tabla 2.3. La ecuación (4.4) es la solución requerida para las ecuaciones diferenciales definidas en (4.1) y (4.2).

La intensidad de campo magnético a una distancia horizontal x de la línea (a nivel del terreno) se calculan a partir de la corriente obtenida en (4.4). Empleando la ley de Ampere y el método de imágenes, el campo magnético es”. (Tejada Martinez, 2008)

$$H_x = \frac{I}{2\pi} \left[\frac{h}{h^2+x^2} + \frac{h+p}{(h+p)^2+x^2} \right] \quad (4.6)$$

donde:

h = altura del conductor.

x = distancia del punto de medición.

P = profundidad de penetración, definida como

$$P = \sqrt{\frac{\rho_e}{j\omega\mu_e}} \quad (4.7)$$

donde ρ_e y μ_e son la resistividad y permeabilidad del terreno, respectivamente. Ahora, asumiendo la propagación de onda en modo cuasi-TEM (cuasi-

transversal electromagnético), la intensidad del campo eléctrico se obtiene como:

$$E_y = Z_0 H_x \quad (4.8)$$

donde Z_0 es la impedancia de onda en espacio libre, llamada también impedancia característica del espacio libre definida por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 120\pi \quad (4.9)$$

Donde:

μ_0 = Permeabilidad magnética: $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

ϵ_0 = Permitividad dieléctrica: 8.854×10^{-12} F/m

de tal manera que:

$$E_y = 60I \left[\frac{h}{h^2 + x^2} + \frac{h+2p}{(h+2p)^2 + x^2} \right] \quad (4.10)$$

“La intensidad de campo eléctrico debido a RI por corona, E_y , suele expresarse en $\mu\text{V/m}$ o más comúnmente en dB sobre $1\mu\text{V/m}$, de la siguiente forma”. (Tejada Martinez, 2008)

$$E_y(\text{dB}) = 20 \log_{10} \frac{E_y(\mu\text{V/m})}{1\mu\text{V/m}} \quad (4.11)$$

4.2.2 LINEA MULTICONDUCTORA

Para el caso de una línea multiconductora se tienen las siguientes ecuaciones:

$$-\frac{dV}{dz} = ZI \quad (4.12)$$

$$-\frac{dI}{dz} = YV - J \quad (4.13)$$

“La intensidad de campo eléctrico o gradiente eléctrico promedio en la superficie de un conductor de radio r se calcula por medio del teorema de Gauss. Para un empaquetamiento de n_c conductores por fase”. (Tejada Martinez, 2008)

$$g_{avg} = \frac{1}{n_c} \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (4.14)$$

donde:

q = carga

ϵ_0 = permitividad del vacío

r = radio de cada conductor

n_c = número de conductores por haz

La carga q es calculada a partir de:

$$\mathbf{q} = \mathbf{C}\mathbf{V} \quad (4.15)$$

“Es importante considerar el desfaseamiento de las tensiones de cada una de las fases. Para el cálculo de la función de excitación Γ , se utilizan los valores de gradiente máximo”. (Tejada Martinez, 2008)

obtenidos para la i -ésima fase como:

$$g_{im\acute{a}x} = g_{iavg} \left[1 + (n_c - 1) \frac{r_i}{R_i} \right] \quad (4.16)$$

donde:

“ R_i es el radio del haz. A fin de desacoplar el sistema trifásico, se aplica análisis modal para obtener las constantes de atenuación y corrientes en el dominio de modos. Se tiene que”. (Tejada Martinez, 2008)

$$\lambda_V = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{Y} \mathbf{M} \quad (4.17)$$

$$\lambda_I = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{Z} \mathbf{N} \quad (4.18)$$

donde:

“ λ_V y \mathbf{M} son las matrices de valores propios (diagonal) y vectores propios del producto $\mathbf{Z}\mathbf{Y}$. De igual forma, λ_I y \mathbf{N} son las matrices de valores propios (diagonal) y vectores propios del producto $\mathbf{Y}\mathbf{Z}$. Además, $\lambda_V = \lambda_I = \lambda$ y $\mathbf{M} = (\mathbf{N}^\dagger)^{-1}$. Las matrices de constante de propagación modal Ψ y constantes de atenuación modal α_m se calculan de la siguiente forma”. (Tejada Martinez, 2008)

$$\Psi = \sqrt{\lambda} \quad (4.19)$$

$$\alpha_m = \text{Re}\{\Psi\} \quad (4.20)$$

El vector de corrientes de inyección de corona, \mathbf{J} , se obtiene extendiendo al caso multiconductor:

$$\mathbf{J} = \frac{c}{2\pi\epsilon_0} \Gamma \quad (4.21)$$

En el dominio modal se tiene:

$$\mathbf{J}_m = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{J} \quad (4.22)$$

Empleando (4.20) y (4.22), los componentes modales de corriente en los conductores se calculan como:

$$\mathbf{I}_m = \begin{bmatrix} \frac{J_{m1}}{2\sqrt{a_{m1}}} \\ \frac{J_{m2}}{2\sqrt{a_{m2}}} \\ \vdots \\ \frac{J_{mn}}{2\sqrt{a_{mn}}} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

donde $J_{m1}, J_{m2}, \dots, J_{mn}$ son los elementos del vector \mathbf{J}_m , mientras que $a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{mn}$ son las constantes de atenuación modales, es decir, los elementos de la matriz α_m

El flujo de corriente en todos los conductores debido a cada uno de los modos es:

$$\mathbf{I} = \mathbf{N} \text{diag}(\mathbf{I}_m) \quad (4.24)$$

donde $\text{diag}(\mathbf{I}_m)$ es una matriz diagonal formada por los elementos del vector \mathbf{I}_m . \mathbf{I} es entonces una matriz de $n \times n$, con sus renglones representando las fases de la línea y sus columnas representando los modos. La intensidad de campo magnético a una distancia horizontal x de la línea (a nivel del terreno) debido al k -ésimo modo se calcula como:

$$H_{x,k} = \sum_{i=1}^n \frac{I_{i,k}}{2\pi} \left[\frac{h_i}{h_i^2 + (x_i - x)^2} + \frac{h_i + 2P}{(h_i + 2P)^2 + (x_i - x)^2} \right] \quad (4.25)$$

donde:

$I_{i,k}$ = elemento del i -ésimo renglón y k -ésima columna de la matriz \mathbf{I}

h_i = altura del i -ésimo conductor

x_i = distancia del i -ésimo conductor

x = punto de medición

La componente vertical correspondiente de intensidad de campo eléctrico, asumiendo nuevamente un modo de propagación cuasi-TEM es:

$$E_{y,k} = Z_0 H_{x,k} \quad (4.26)$$

Después de determinar la componente de intensidad de campo eléctrico debida a cada modo, el campo eléctrico total debido a todos los modos se calcula mediante una suma rms

$$E_{y,total} = \sqrt{\sum_{k=1}^n |E_{y,k}|^2} \quad (4.27)$$

“La ecuación anterior se justifica suponiendo que las velocidades de cada modo son iguales y por lo tanto las corrientes modales están en fase.

Por otro lado, cada fase de la línea genera un campo de interferencia en el periodo en el cual se originan las descargas corona (streamers) positivas, es decir, en los valores cercanos al pico positivo de la tensión senoidal. Por consiguiente, una línea trifásica genera tres campos de interferencia desplazados en el tiempo. Si se coloca un instrumento de medición cercano a la línea, este medirá el nivel de RI total siguiendo el criterio establecido por el CISPR, el cual indica que, si uno de los campos es más alto que los demás por más de 3dB, el instrumento de medición sólo tomara en cuenta dicho campo. De lo contrario, se tomarán los dos campos más altos y se aplicará la siguiente ecuación para obtener el campo total”. (Tejada Martinez, 2008)

$$E_{CISPR} = \frac{E_1 + E_2}{2} + 1.5dB \quad (4.28)$$

“En la Fig. 4.2 se presenta un diagrama a bloques mostrando la secuencia de pasos del método de cálculo descrito, el cual se implementó en un programa de cómputo utilizando el lenguaje de programación MATLAB” (Tejada Martinez, 2008).

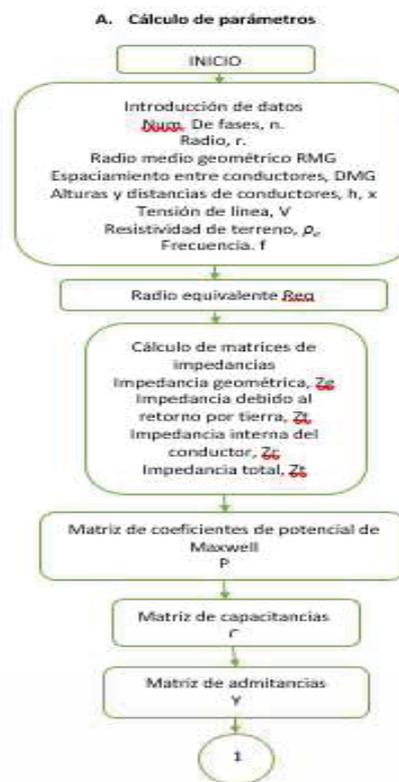


FIGURA 4 2. Diagrama a bloques del método de predicción de perfiles de RI.

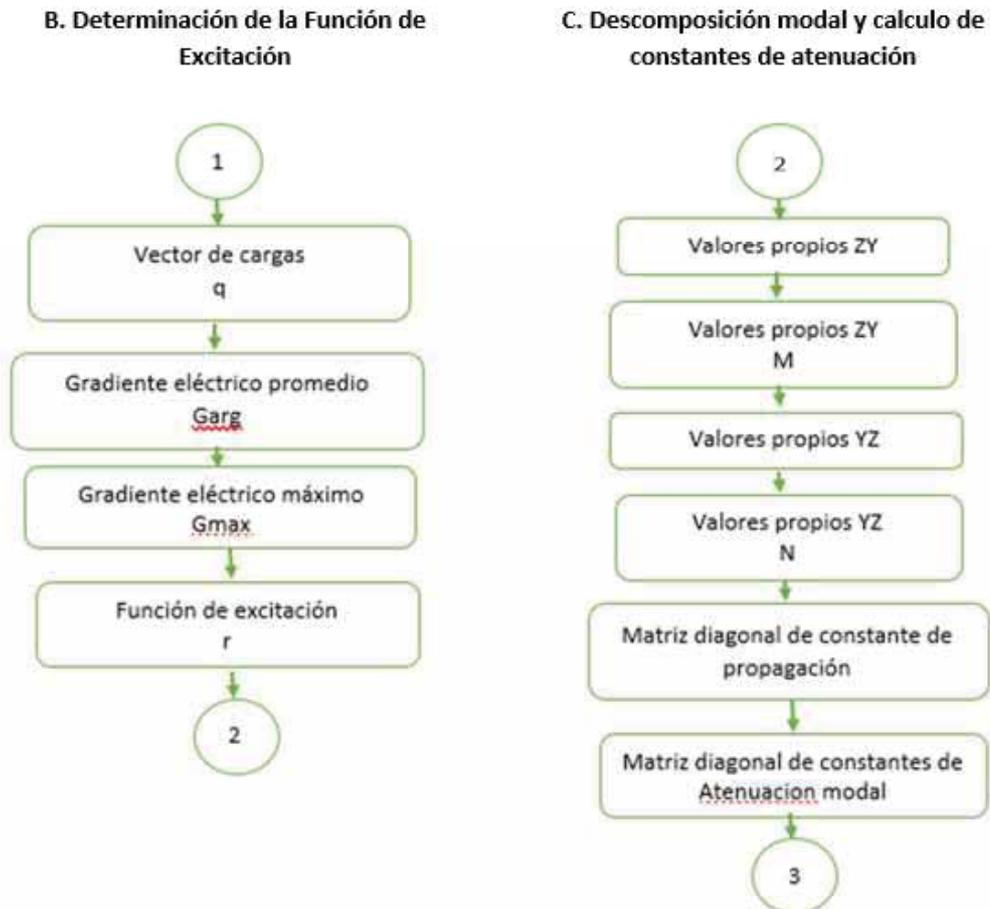


FIGURA 4 3. Diagrama a bloques del método de predicción de perfiles de RI (continuación).

D. Determinación de perfiles de RI para cada fase con funciones de excitación unitarias

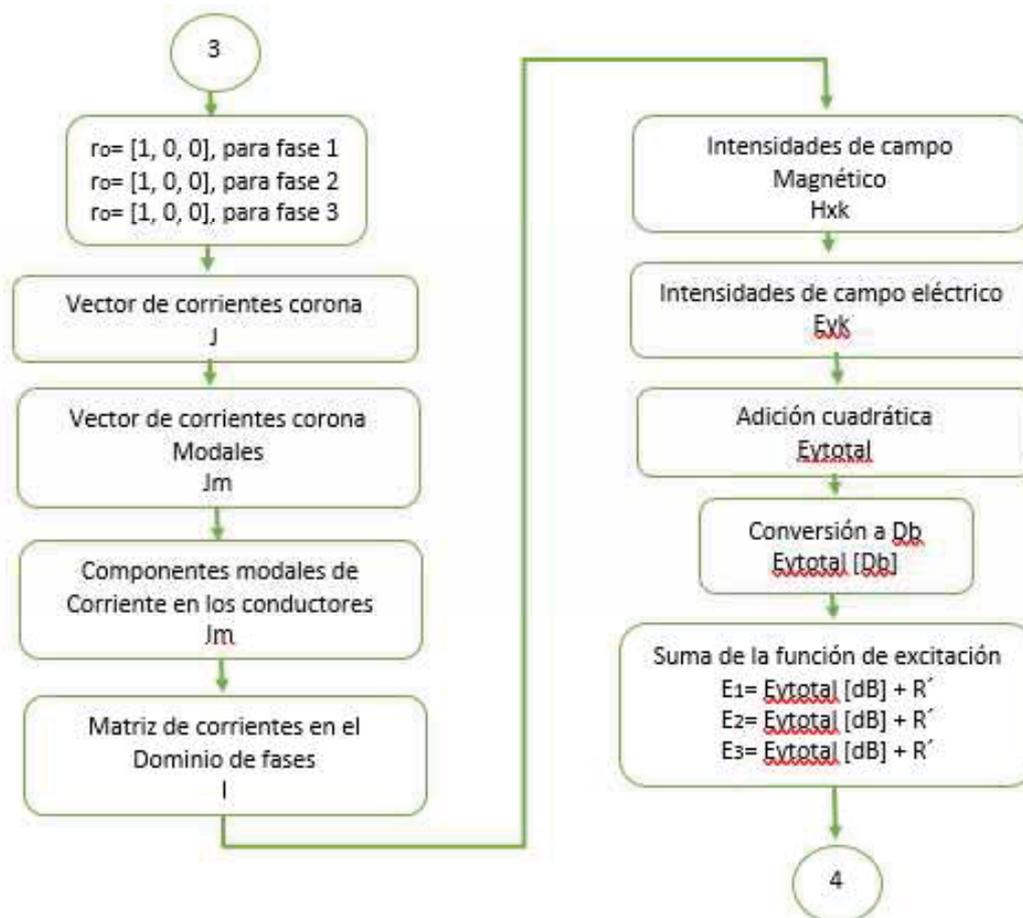


FIGURA 4 4. Diagrama a bloques del método de predicción de perfiles de RI (continuación).



FIGURA 4 5. Diagrama a bloques del método de predicción de perfiles de RI (continuación).

4.3 CASOS DE PRUEBA

“En esta sección se presentan algunos ejemplos de aplicación en líneas de transmisión trifásicas de alta tensión, en los cuales se determinan los perfiles de RI en dB sobre $1\mu\text{V}/\text{m}$, en un rango de distancias de 0 a 150 m sobre el nivel de suelo. Los cálculos son realizados a una frecuencia de 500 kHz, considerando una resistividad del terreno de $100 \Omega \cdot \text{m}$. Se simuló la aparición de corona en cada una de las fases por separado utilizando como función de excitación la fórmula optimizada de la Boneville Power Administration (BPA), segunda de la Tabla 2.3 Para obtener el nivel de RI total que mediría un instrumento de medición que considera valores cuasi-pico (CP), se aplicó el criterio del CISPR utilizando la ecuación (4.28). Los métodos 1 y 2 señalados en las figuras se describen a continuación:

horizontal y en configuración triangular. Por otro lado, para desacoplar el sistema trifásico se utiliza la matriz de modos de Clarke, la cual está definida en general para sistemas balanceados.

Método 2: Descrito en este capítulo. Las constantes de atenuación se calculan directamente de los parámetros eléctricos de la línea, en los cuales se considera el efecto “skin” en conductores y el plano del terreno. El sistema se desacopla aplicando análisis modal, de tal manera que la precisión no se ve afectada en el análisis de sistemas con configuraciones geométricas arbitrarias” (Tejada Martínez, 2008).

Para los casos de estudio que se presentan, se utilizaron diferentes configuraciones de líneas trifásicas que se extrajeron de (LaForest, 1981). Para efectos de comparación, se separaron los ejemplos en dos grupos de configuraciones: por un lado, se analizan líneas en configuración horizontal y triangular, y por otro, líneas en configuración vertical. Además de las gráficas obtenidas, también se muestran las constantes de atenuación obtenidas con el método de Gary (método 1) y con el método 2, presentado en este trabajo.

4.3.1 LINEAS EN CONFIGURACION HORIZONTAL Y TRIANGULAR

Ejemplo 1

“En este primer ejemplo se analiza el caso de una línea de transmisión trifásica de 380 kV, en configuración triangular formada por 2 conductores por fase, los subconductores tienen un radio de 0.0132 m y el radio del haz es de 0.2 m. La configuración geométrica de la línea se muestra en la Fig. 4.6” (Tejada Martínez, 2008).

Se analizan los resultados obtenidos y se comparan con los presentados en (M. R. Moreau, 1971). En la Fig. 4.7 se muestra el perfil de RI total en donde se observa que éste disminuye conforme la distancia lateral de la línea aumenta. También se puede apreciar que el resultado de los dos métodos tiende a diferir para distancias laterales mayores, ya que a una distancia de 150 m la diferencia entre ambos métodos es de 5 dB, además sus constantes de atenuación modales también muestran gran diferencia como se observa en la Tabla 4.1.

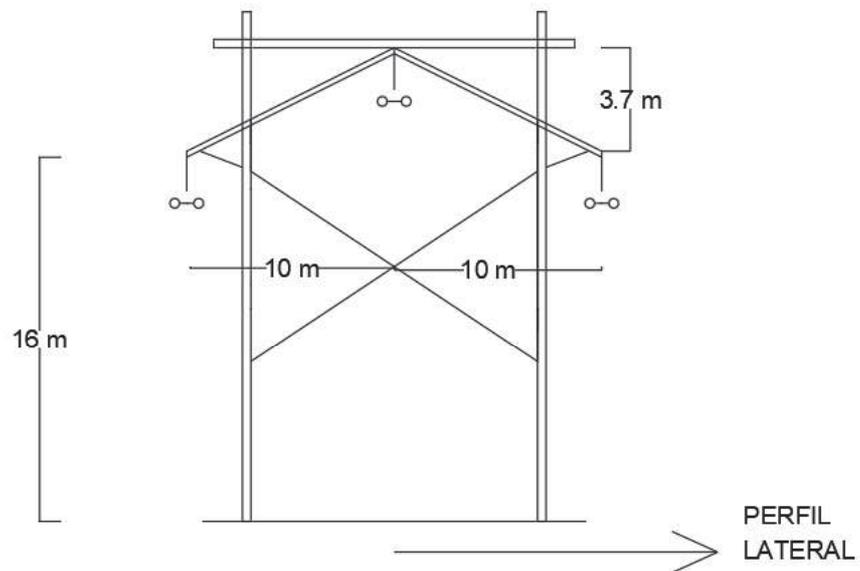


FIGURA 4 6. Características geométricas de la línea trifásica de 380 kV.

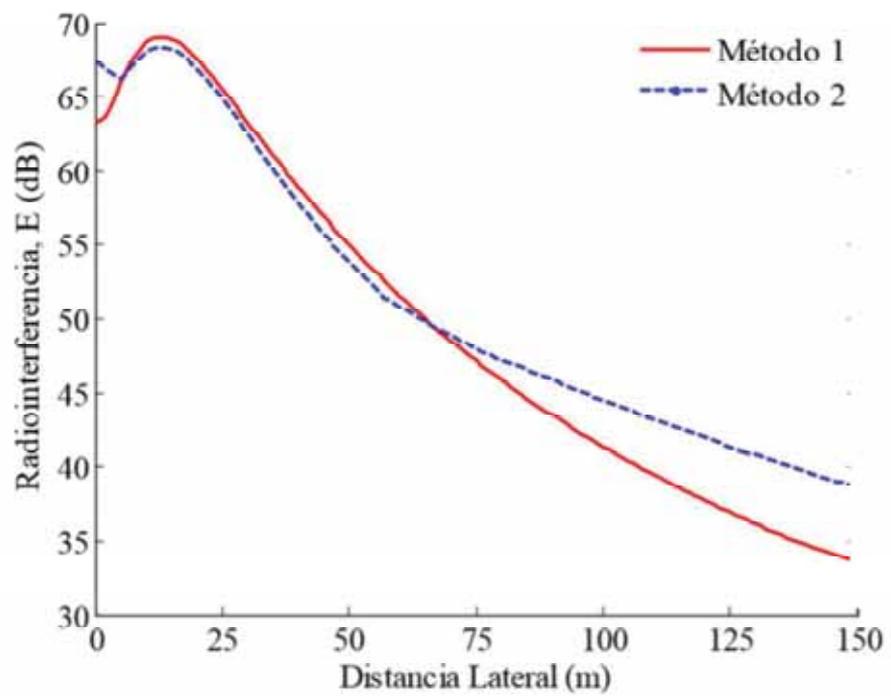


FIGURA 4 7. Perfil de RI total de la línea trifásica de 380 kV

TABLA 4 1. Constantes de atenuacion para el ejemplo 1

Modo	Constantes de atenuación α (Np/m)	
	Método 1	Método 2
1	21.5×10^{-6}	2.9×10^{-6}
2	21.5×10^{-6}	36.5×10^{-6}
3	342×10^{-6}	295.5×10^{-6}

Ejemplo 2

“Para este ejemplo se presenta el caso de una línea de transmisión trifásica de 400 kV formada por 2 conductores por fase, con un radio de cada subconductor de 0.016 m y radio de haz de 0.225 m. La configuración geométrica de la línea se muestra en la Fig. 4.8.

Los resultados de la simulación se presentan en la Fig. 4.9, en donde se observa que inicialmente la diferencia entre los métodos es de alrededor de 5 dB, ya que con el método 1 se tiene un nivel de RI de 58 dB y con el método 2 un nivel de 63 dB. Sin embargo, conforme aumenta la distancia lateral el nivel de radiointerferencia y la diferencia entre ambos métodos van disminuyendo. En la Tabla 4.2 se muestran las constantes de atenuación utilizadas por los métodos 1 y 2, para cada uno de los modos” (Tejada Martinez, 2008).

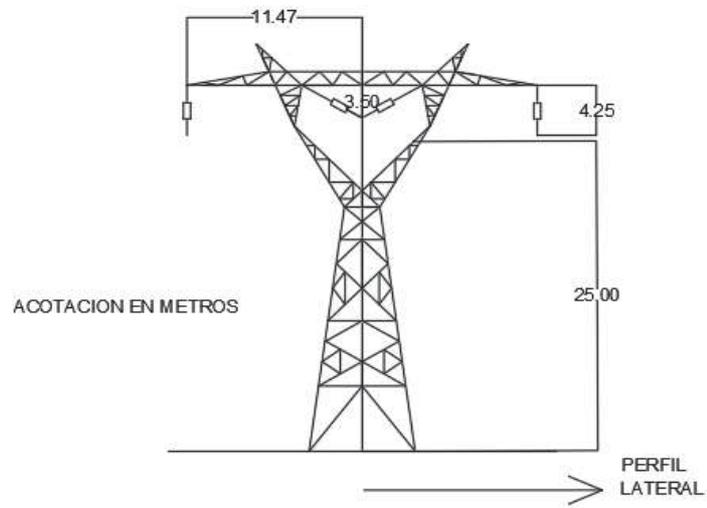


FIGURA 4 8. Características geométricas de la línea trifásica de 400 kV.

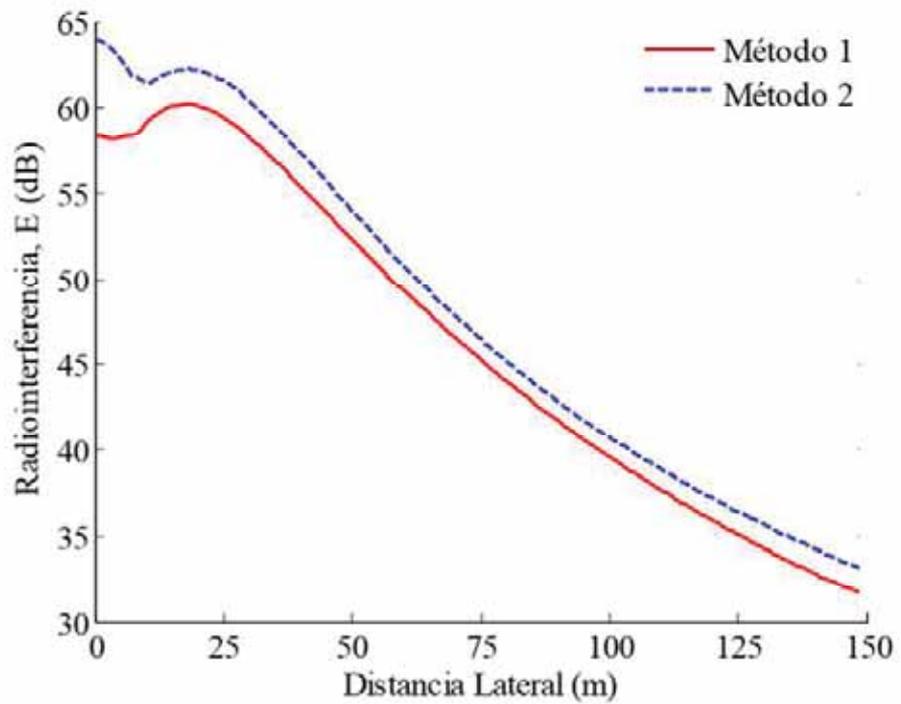


FIGURA 4 9. Perfil de RI total de la línea trifásica de 400 kV.

TABLA 4 2. Constantes de atenuación para el ejemplo 2.

	Constantes de atenuación α (Np/m)	
	Método 1	Método 2
1	21.5×10^{-6}	2.5×10^{-6}
2	21.5×10^{-6}	17.8×10^{-6}
3	342×10^{-6}	201.7×10^{-6}

Ejemplo 3

“Se presenta ahora el caso de una línea de transmisión trifásica de 750 Kv, en configuración horizontal, formado por 4 conductores por fase con un radio de subconductor de 0.0155 m y radio de haz de 0.212 m. La configuración geométrica de la línea se muestra en la figura 4.10.

Los resultados obtenidos se presentan en la figura 4.11, en donde se observa que el nivel máximo de Radiointerferencia es de 79 dB y la diferencia entre ambos métodos para todo el perfil es de alrededor de 2 dB”. (Tejada Martinez, 2008)

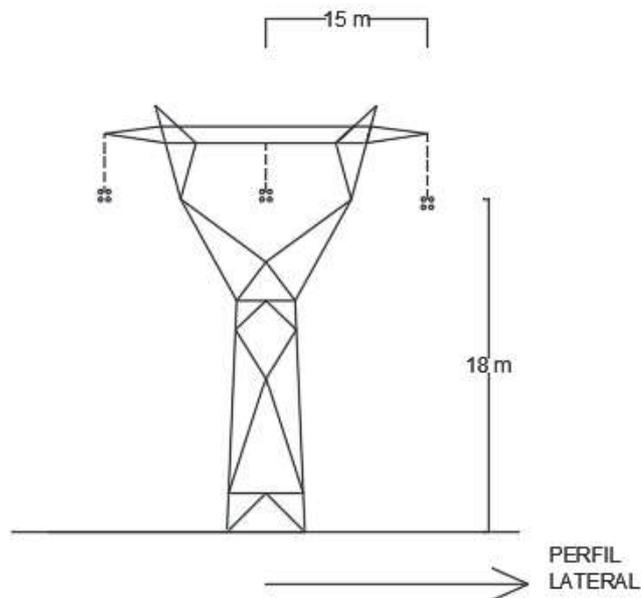


FIGURA 4 10. Características geométricas de la línea trifásica de 750 KV

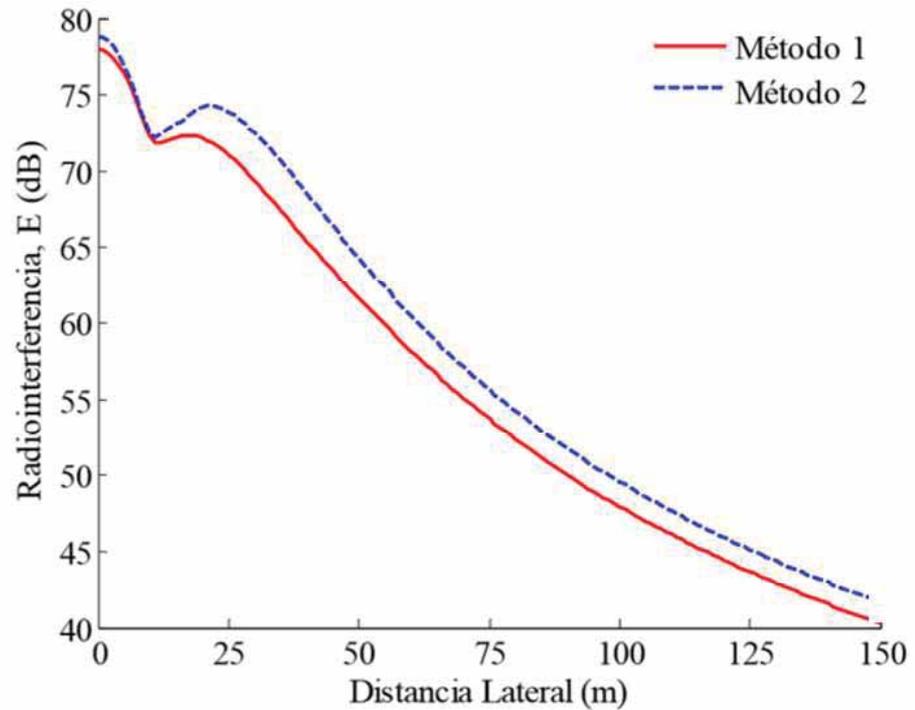


FIGURA 4 11. Perfil de RI total de la línea trifásica de 750 KV

Ejemplo 4

Para este ejemplo se analiza una línea de transmisión trifásica de 138 kV formada por 1 conductor por fase, con un radio de 0.010 m. La configuración geométrica de la línea se muestra en la Fig. 4.12. Los resultados de la Fig. 4.13 nos muestran también una gran diferencia entre los métodos, para una distancia de 0 m se tienen 4 dB de diferencia y para 150 m se tienen 8 dB. En la Tabla 4.3 se observan las constantes de atenuación modales.

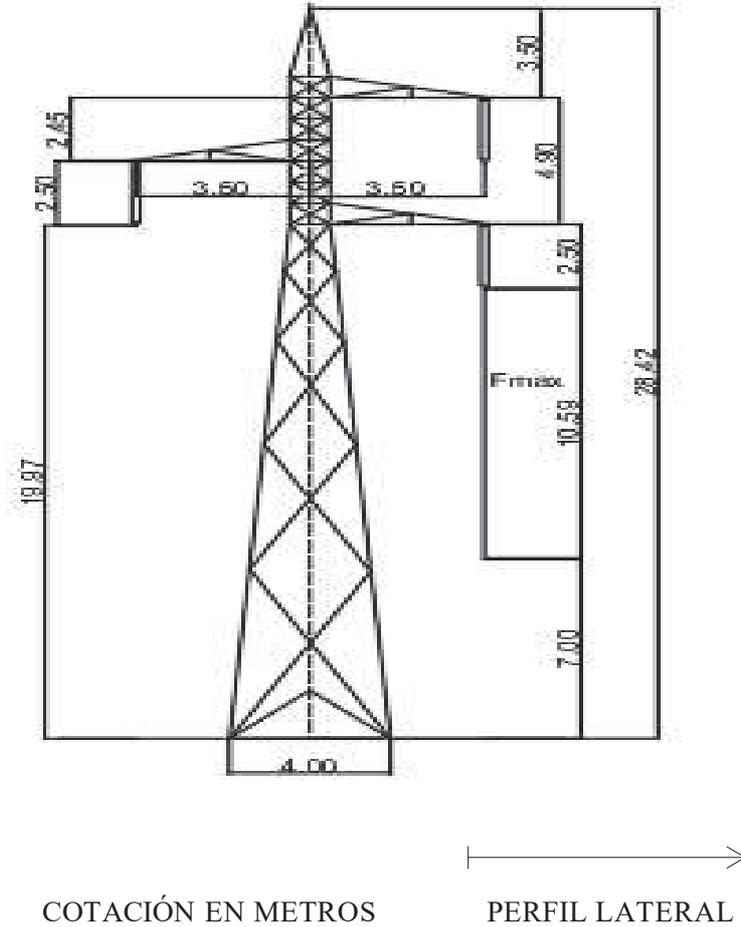


FIGURA 4 12. Características geométricas de la línea trifásica de 138 kV

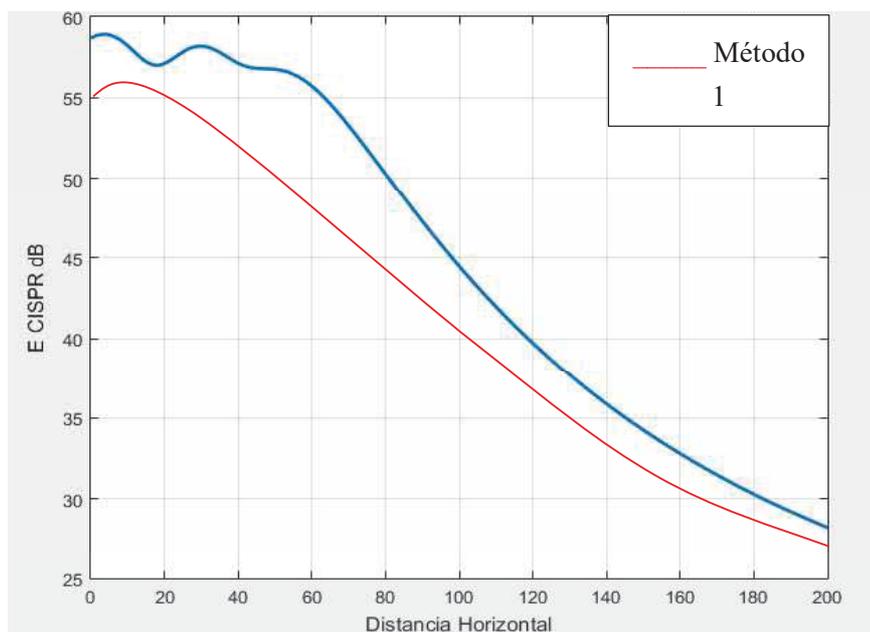


FIGURA 4 13.Perfil de RI total de la línea trifásica de 138 Kv

TABLA 4 3.Constantes de atenuación para el ejemplo 4.

	Constantes de atenuación α (Np/m)	
	Método 1	Método 2
1	21.5×10^{-6}	4.3×10^{-6}
2	21.5×10^{-6}	4.9×10^{-6}
3	342×10^{-6}	131.3×10^{-6}

4.3.2 LINEAS EN CONFIGURACION VERTICAL

Ejemplo 5

“Ahora se consideran algunas configuraciones de tipo vertical. En este caso se presenta una línea de transmisión trifásica de 500 kV formada por 3 conductores por fase, con un radio de cada subconductor de 0.0191 m y radio de haz de 0.2286 m. La configuración geométrica de la línea se muestra en la Fig. 4.14. Los resultados de la simulación se presentan en la Fig. 4.15 en donde se aprecia una gran diferencia entre ambos métodos. Inicialmente se observa una diferencia de 4 dB, pero conforme aumenta la distancia lateral la diferencia también se hace más notable. Para 150 m, con el método 1 se tiene un nivel de

RI de 33 dB y con el método 2 se tiene 44 dB, es decir una diferencia de 11 dB. De igual forma, las constantes de atenuación muestran gran diferencia como se aprecia en la Tabla 4.4". (Tejada Martinez, 2008)

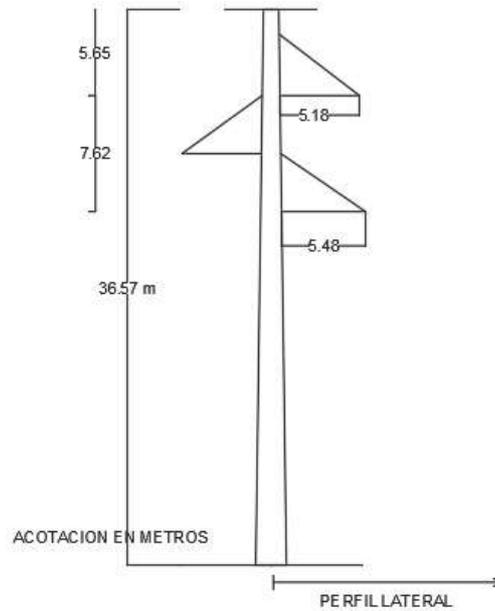


FIGURA 4 14. Características geométricas de una línea trifásica de 500 kV.

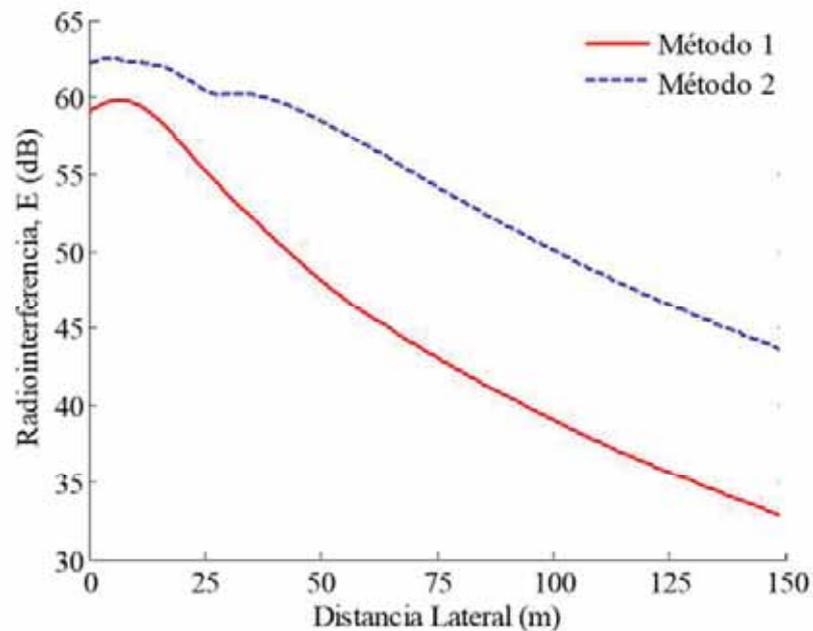


FIGURA 4 15. Perfil de RI total de la línea trifásica de 500 kV.

TABLA 4 4. Constantes de atenuación para el ejemplo 5.

	Constantes de atenuación α (Np/m)	
	Método 1	Método 2
1	21.5×10^{-6}	6.6×10^{-6}
2	21.5×10^{-6}	2.4×10^{-6}
3	342×10^{-6}	191.3×10^{-6}

4.4 COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En esta sección se exponen comparaciones entre los resultados obtenidos con el método presentado en este trabajo y resultados de mediciones de RI publicados en (R. G. Olsen, 1992). En las Tablas 4.5. y 4.6. se reproducen los datos de las líneas de transmisión en las cuales se efectuaron las mediciones en dicha referencia. Las 4 líneas se encuentran a diferentes alturas sobre el nivel de mar, por lo cual se realizó una corrección de +1 dB por cada 300 m como se indica en (R. G. Olsen, 1992). También se realizaron correcciones en el caso de mediciones efectuadas a frecuencias diferentes de 500 kHz, utilizando la Fig. 2 de (M. R. Moreau, 1971). En la Tabla 4.7. y Fig. 4.16 se

presentan los resultados de las mediciones realizadas en clima estable desfavorable y los obtenidos con los métodos 1 y 2. En la mayoría de los casos, con el método 2 se obtienen resultados más cercanos a las mediciones, lo cual evidencia que las modificaciones realizadas al método de Gary resultan en mejores predicciones de RI.

TABLA 4 5.Datos geométricos de las líneas de estudio.

Línea	Altitud (m)	Tensión (kV)	Fases	Diámetro del conductor (mm)	Número de sub conductores	Espaciamiento entre subconductores (cm)	Distancia horizontal de conductores (m)			Altura de conductores (m)		
							A	B	C	A	B	C
1	350	380	3	50.0	2	20.0	-9.6	0	9.6	16	19.777	16.56
2	50	400	3	31.0	2	45.0	-12	0	122	25	26	25
3	60	750	3	35.0	4	45.7	-15.2	0	15.2	17.1	17.1	17.1
4	3500	138	3	20.2.	4	45.7	-3.5	0	3.5	17.5	22.5	20.4

TABLA 4 6.Gradientes de campo eléctrico y parámetros utilizados en las mediciones

Línea	Gradiente eléctrico en conductores (kV/cm)			Altura de la antena (m)	Frecuencia (MHz)	Resistividad de terreno ($\Omega \cdot m$)	Distancia de medición (m)	Detector
	Fase A	Fase B	Fase C					
1	15.07	15.93	15.07	3	0.5	250	24.6	CISPR
2	15.42	16.21	15.42	2	0.5	250	27.0	CISPR
3	16.19	17.29	16.19	2	1	250	0	ANSI
4	19.50	20.95	19.50	5	1.025	125	28.7	ANSI

TABLA 4 7.Comparación entre mediciones y valores calculados de RI.

Línea	Medición (dB)	Método 1 (dB)	Método 2 (dB)
1	73	67.65	70.72
2	66	59.92	62.02
WW3	73	70.38	69.84
4	64	62.12	59.12

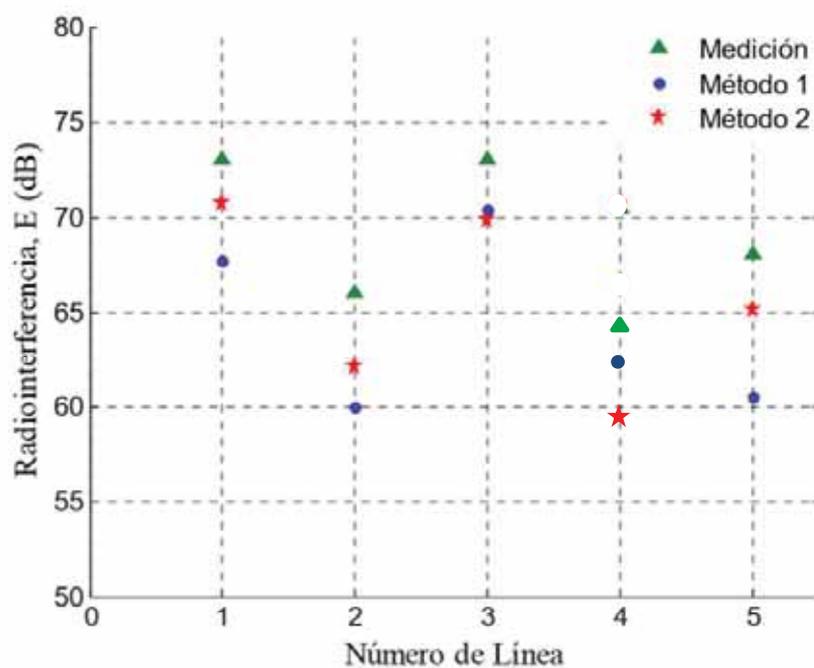


FIGURA 4 16. Comparación de resultados con mediciones.

4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Analizando los ejemplos de aplicación de la sección 4.3, se observó que en el caso de líneas en configuración horizontal y triangular los resultados de los métodos 1 y 2 son muy similares, presentándose en algunos casos las discrepancias más significativas en los primeros 5 metros de medición con 3 a 5 dB de diferencia (Ejemplos 1 y 2), y a distancias mayores a 100 m con 5 dB de diferencia (Ejemplo 1). Aun así, las diferencias de los resultados de ambos métodos para el resto del perfil de RI de cada una de las líneas son menores a 2 dB. Sin embargo, para el caso de líneas en configuración vertical, los resultados de los métodos 1 y 2 presentan

discrepancias mayores las cuales se acrecentan conforme la distancia lateral de la línea aumente, llegándose a obtener diferencias del orden de 8 a 11 dB en la mayor parte del perfil de las líneas.

“Las grandes diferencias en los perfiles de RI para líneas en configuración vertical pueden deberse a que en algunas secciones del método de Gary (método 1), los cálculos están enfocados a líneas balanceadas. Por ejemplo, el procedimiento utilizado para desacoplar el sistema trifásico es mediante el empleo de la matriz de modos de Clarke, y las constantes de atenuación se toman como valores promedio para líneas en configuración horizontal y triangular, razón por la cual los resultados de los métodos 1 y 2 para este tipo de líneas tuvieron sólo pequeñas diferencias”. (Tejada Martinez, 2008)

La comparación de los resultados de los métodos 1 y 2 con mediciones experimentales, muestran que las adecuaciones realizadas al método de Gary conducen a mejores predicciones de radiointerferencia, ya que para la mayoría de los casos con el método 2 se obtuvieron resultados más cercanos a los valores medidos, teniéndose una exactitud de 3 a 4.5 dB sobre el método 1. No obstante, en el caso de la línea 3, el método 1 se acercó un poco más a la medición, con 0.54 dB sobre el método 2. Lo anterior puede deberse a que esta fue la única medición que se efectuó a 0 m de distancia, es decir, justo debajo de la línea, y como se vio en los ejemplos de aplicación, para líneas en configuración horizontal como es el caso de la línea 3, las diferencias más significativas se presentan en los primeros metros del perfil.

También hay que tomar en cuenta que se pueden tener fuentes error en los factores de corrección para la altitud sobre el nivel de mar y para frecuencias de medición diferentes a 500 kHz. Aunado a lo anterior, se utilizaron diferentes tipos de instrumentos y antenas en cada una de las mediciones (M. R. Moreau, 1971). (R. G. Olsen, 1992).

De cualquier forma, la diferencia de los resultados obtenidos con ambos métodos para la línea 3 es mínima (0.54 dB), y las comparaciones con las otras 4 mediciones indican que los niveles de RI obtenidos con el método 2 son más exactos que los obtenidos con el método 1.

CAPITULO V

EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE ATENUACIÓN DE RI

5.1 INTRODUCCIÓN

Como se ha visto en los capítulos anteriores, La intensidad del efecto corona es función del campo eléctrico en la superficie de los conductores, el campo eléctrico se relaciona con el voltaje de la línea. Los conductores de gran diámetro tienen gradientes de campo eléctrico más bajos en la superficie del conductor, por tanto, el efecto corona es menor con relación a los conductores de menor diámetro.

Por lo tanto, al buscar minimizar los niveles de RI por corona, debemos orientarnos en la reducción de dicho campo, lo cual a su vez puede conseguirse al aumentar el radio de los conductores o el radio equivalente de un haz de subconductores.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para los perfiles de RI de diferentes líneas, empleando el método descrito en el Capítulo IV, al aumentar el espaciamiento entre subconductores de un haz, lo cual a su vez aumentará el radio equivalente del mismo. También se obtuvieron resultados con respecto a la variación en el número de subconductores por haz; generalmente con el aumento del número de subconductores, se logran atenuar los niveles de RI generados por la línea; sin embargo, la distancia entre los subconductores debe ser seleccionada adecuadamente para obtener la máxima reducción posible, como se mostrará más adelante.

Como herramienta auxiliar, se empleó el programa de simulación de campos electromagnéticos COMSOL Multiphysics, para analizar la distribución e intensidad del campo eléctrico ante distintas configuraciones simples de conductores energizados (COMSOL, User's Guide and Introduction. COMSOL AB, 2005), (COMSOL, Reference Manual. COMSOL AB, 2005).

5.2 SELECCIÓN DE CONDUCTORES

“Las líneas de transmisión tienen el propósito de transportar la energía eléctrica

entre dos puntos de una manera segura y confiable. Se puede considerar a los conductores como la parte más importante de una línea de transmisión, ya que son éstos los que conducen la energía eléctrica. Además, la compra de los conductores corresponde al 30 – 50 % del total de la inversión para la instalación de una línea de transmisión”. (F. Kiessling, 2003)

En la construcción de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica en alta tensión, se utilizan casi exclusivamente conductores metálicos desnudos, que se obtienen mediante cableado de hilos metálicos (alambres) alrededor de un hilo central. Los metales utilizados en la construcción de líneas aéreas deben poseer tres

- 1) Una baja resistencia eléctrica, y en consecuencia bajas pérdidas por efecto Joule.
- 2) Elevada resistencia mecánica, de tal manera que se tenga una elevada resistencia a los esfuerzos permanentes o accidentales.
- 3) Costo limitado, En los inicios de la transmisión de potencia eléctrica los conductores eran principalmente de cobre; no obstante, estos han sido reemplazados por conductores de aluminio para líneas aéreas debido a su menor costo y ligereza con respecto a los de cobre para un mismo valor de resistencia. Otra ventaja es el hecho de que el conductor de aluminio tenga mayor diámetro que el de cobre con la misma resistencia, ya que, con un diámetro mayor, las líneas de flujo eléctrico que se originan en el conductor se encuentran más separadas en su superficie para la misma tensión. Con lo anterior se logra tener un menor gradiente eléctrico en la superficie del conductor (J. J. Grainger, 1996).

Los símbolos que identifican a los diferentes tipos de conductores de aluminio son los siguientes:

AAC	Todos los conductores de aluminio
AAAC	Todos los conductores de aleación de aluminio
ACSR	Conductores de aluminio con alma de acero
ACAR	Conductores de aluminio con alma de aleación

Un tipo de conductor conocido como ACSR *expandido*, tiene un relleno de papel que separa los hilos de acero del interior de los de aluminio que están en el exterior. El papel le da un diámetro más grande, con lo cual se pueden reducir las posibilidades de aparición de corona (J. J. Grainger, 1996).

5.3 CONDUCTORES EN HAZ

En los inicios de los sistemas de transmisión de alta tensión, se reconoció que el campo eléctrico en la superficie de los conductores era un factor importante en la generación de corona, y debido a que la intensidad de dicho campo decrece en proporción inversa al radio del conductor, se empezó a incrementar el diámetro de los conductores. Sin embargo, esta era una solución poco económica ya que la cantidad de material necesaria para la construcción de los conductores era mayor. Otra opción fue utilizar conductores huecos, pero no se tuvo gran éxito debido a las complicaciones en la manufactura y mantenimiento de los mismos (Maruvada, 2000).

La solución que ha permitido utilizar tensiones de transmisión cada día más elevadas fue la introducción de conductores en haz. En 1930, Markt y Mengele obtuvieron la patente para esta alternativa. Ellos describieron las ventajas de utilizar varios conductores por fase tales como lograr que se presenten menores gradientes de potencial en la superficie de los conductores, así como incrementar la capacidad de transmisión de la línea.

“En la actualidad, la mayoría de las líneas de transmisión utilizan conductores en haz; de hecho, para tensiones de transmisión mayores a 420 kV no es factible utilizar un solo conductor por fase”. (F. Kiessling, 2003)

En la Fig. 5.1 se ilustra un haz de 6 conductores. Las características principales de un haz son el número de subconductores n_C , su radio r , radio del haz R , radio equivalente R_{eq} , los valores promedio, máximo y mínimo del gradiente eléctrico superficial, E_a , $E_{máx}$, $E_{mín}$ respectivamente, y la separación entre subconductores adyacentes dada por:

En la Fig. 5.1 se ilustra un haz de 6 conductores. Las características principales de un haz son el número de subconductores n_C , su radio r , radio del haz R , radio equivalente R_{eq} , los valores promedio, máximo y mínimo del gradiente eléctrico superficial, E_a , $E_{máx}$, $E_{mín}$ respectivamente, y la separación entre subconductores adyacentes dada por:

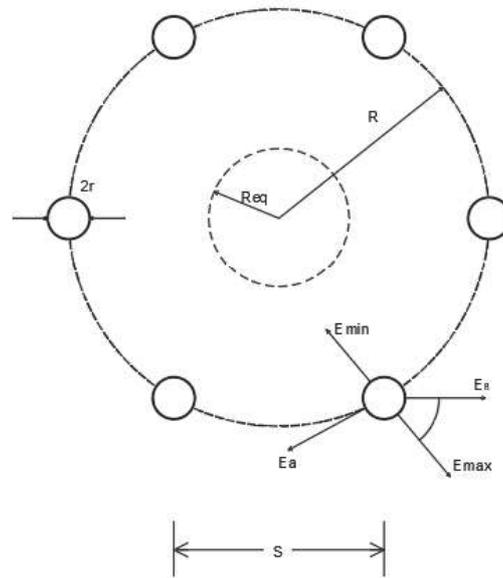


FIGURA 5 1. Haz de seis subconductores.

$$S = 2R \operatorname{sen} \left(\frac{\pi}{n_c} \right) \quad (5.1)$$

El radio equivalente corresponde al radio de un cilindro imaginario que tendría la misma capacitancia del haz verdadero respecto a todos los subconductores y está dado por:

$$R_{eq} = \sqrt[n_c]{n_c r R^{(n-1)}} \quad (5.2)$$

“Para la determinación del gradiente eléctrico, se recurre a los coeficientes de potencial y se determina la carga total q del haz de conductores, utilizando para ello el radio equivalente”

(Siegert, 1988) El valor promedio del gradiente eléctrico se obtiene con:

$$E_a = \frac{1}{n_c} \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (5.3)$$

Esto supone que la carga total se encuentra uniformemente distribuida en los n_c subconductores del haz. Sin embargo, el efecto de apantallamiento mutuo de un subconductor sobre el otro conlleva a un valor mayor del gradiente eléctrico hacia afuera del haz ($E_{máx}$) que hacia adentro ($E_{mín}$), los cuales se calculan con:

$$E_{m\acute{a}x} = E_a \left[1 + \frac{(n_c - 1)r}{R} \right] \quad (5.4)$$

$$E_{min} = E_a \left[1 - \frac{(n_c - 1)r}{R} \right] \quad (5.5)$$

Generalmente se considera que el campo varía alrededor del haz, con lo cual se tiene:

$$E_{\theta} = E_a \left[1 + \frac{(n_c - 1)r}{R} \cos\theta \right] \quad (5.6)$$

El valor más importante es el de $E_{m\acute{a}x}$, ya que, si este sobrepasa el valor del gradiente crítico o de inyección E_C , se empezarán a observar descargas del tipo corona.

5.4 CALCULO DE CONDUCTORES CON RESPECTO AL ESFUERZO CAUSADO POR LA ALTA TENSIÓN

Los conductores de una línea de transmisión deben ser capaces de resistir los esfuerzos exigidos debido a la alta tensión hasta un grado razonable. Por esta razón, el diseño de líneas de transmisión considerando estos esfuerzos, tanto a la frecuencia del sistema como ante eventos transitorios, juega un papel muy importante en la selección de los conductores. En las siguientes secciones se describe el diseño de los conductores en base a sus parámetros eléctricos, así como cuando se considera el gradiente eléctrico y la presencia de descarga corona en su superficie.

5.4.1 DISEÑO CON RESPECTO A LOS PARAMETROS ELECTRICOS

Los parámetros de una línea de transmisión tales como la reactancia inductiva y capacitiva, están fuertemente influenciados por la geometría y datos del conductor como el radio, espaciamiento y número de subconductores y distancias entre conductores y tierra.

Como un ejemplo se tiene una línea de 138 kV la cual se muestra en la Fig. 5.2, en donde se analiza el impacto del uso de 1 conductor por fase, y utilizando haces de 2, 3 y 4 conductores. El espaciamiento entre subconductores del haz utilizado fue de 0.4 m, así que se calculó el radio del haz despejando R de (5.1) y el radio equivalente R_{eq} se obtuvo de (5.2). Los resultados para los diferentes casos se presentan en la Tabla 5.1, en donde se puede observar como las reactancias capacitivas inductiva, así como la impedancia característica decrecen conforme el número de subconductores aumenta. Por otro lado, la potencia característica de la línea (SIL, por sus siglas en inglés) aumenta con el número de subconductores; de hecho, para un haz cuádruple se tiene un SIL de 640 MW. Además, la aplicación de un espaciamiento mayor entre subconductores de haz conduce a un aumento en el SIL. Esto se pueden ver en la última fila de la Tabla 5.1, en donde se consideró un espaciamiento de 1.0 m con lo cual se logró incrementar el SIL a 765 MW, es decir, un aumento del 20 %.

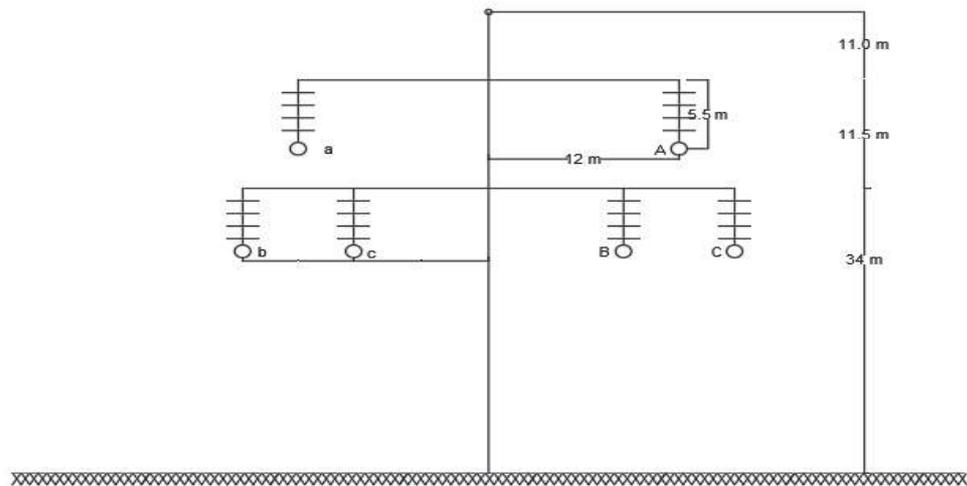


FIGURA 5.2. Dimensiones típicas de una torre de suspensión de 138 kV, circuito doble.

TABLA 5 1. Parámetros Eléctricos de una Línea de Transmisión de 138 kV, con diferentes números de subconductores

Número de sub-conductores	Radio Subconductor (mm)	Radio Equivalente (m)	Reactancia Inductiva (Ω/km)	Resistencia a 50°C (Ω/km)	Capacitancia Secuencia Positiva ($\mu\text{F}/\text{km}$)	Reactancia capacitiva ($\text{M}\Omega \cdot \text{km}$)	Impedancia Característica (Ω)	SIL (MW)
1	29.5	0.030	0.384	0.0169	9.4	0.339	360	445
2	16.5	0.081	0.314	0.0338	11.3	0.282	300	535
3	14.4	0.132	0.280	0.0507	12.6	0.253	260	615
4	10.08	0.174	0.260	0.0676	13.5	0.237	250	640
41)	10.08	0.346	0.217	0.0676	16.2	0.197	210	765

5.4.2 DISEÑO CON RESPECTO AL GRADIENTE EN LA SUPERFICIE DE LOS CONDUCTORES Y EFECTO CORONA

La configuración y dimensiones de los conductores están relacionadas con el gradiente que se presenta en la superficie de los conductores, y por lo tanto de la generación de corona. Debido a las consecuencias que trae consigo el efecto corona, el valor máximo del gradiente en la superficie de los conductores debe mantenerse por debajo de ciertos límites. En la práctica, se recomienda que el gradiente superficial en los conductores de una línea aérea se limite a $17\text{kV}_{\text{rms}}/\text{cm}$ (F. Kiessling, 2003). Por consiguiente, los conductores deben ser seleccionados de tal forma que se cumpla con los requerimientos sobre las emisiones de radiointerferencia y ruido audible. En la siguiente sección se analiza más en detalle el uso de conductores en haz para el control del gradiente eléctrico.

5.5 DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LA SUPERFICIE DE LOS CONDUCTORES

Con el fin de visualizar la distribución del campo eléctrico en el área circundante a un conductor energizado con alta tensión, se realizaron algunas simulaciones con diferentes arreglos de conductores en haz utilizando una herramienta de modelado de fenómenos físicos mediante la aplicación de elemento finito (COMSOL Multiphysics) (COMSOL, User's Guide and Introduction. COMSOL AB, 2005), (COMSOL,

Reference Manual. COMSOL AB, 2005).

Se simularon casos para 1, 2 y 4 conductores por haz, obteniendo la distribución del campo eléctrico y las líneas equipotenciales en la vecindad de los conductores. Primeramente, se analiza un conductor energizado con 138 kV. Partiendo del centro del conductor, se trazó una línea imaginaria (línea de evaluación) terminada 1m a la izquierda y 1m a la derecha sobre la cual se calculó la intensidad de campo eléctrico. Las características del conductor y las líneas equipotenciales en el área circundante se muestran en la Fig. 5.3 y en la Fig. 5.7 se presenta la curva obtenida, observando que la mayor intensidad de campo eléctrico se encuentra en la superficie del conductor, con un valor cercano a 14 kV/cm. En la Fig. 5.8 se muestra que, como era de esperarse, en toda la superficie del conductor se presenta la mayor intensidad de campo eléctrico la cual va disminuyendo conforme la distancia al conductor sea mayor.

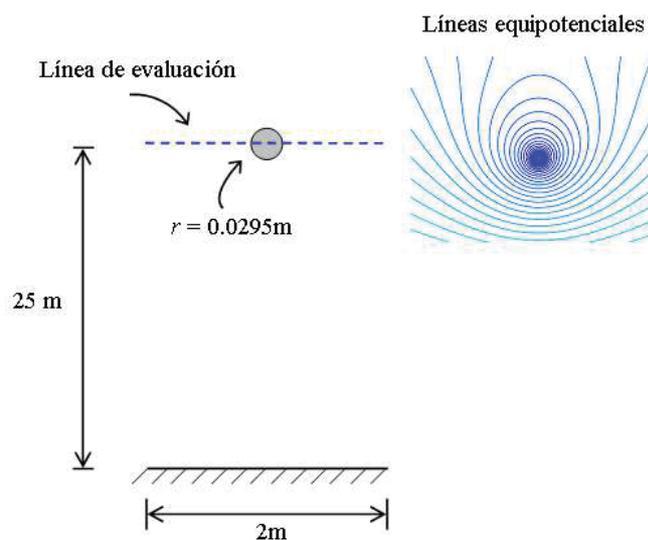


FIGURA 5.3. Líneas equipotenciales alrededor de un conductor energizado con 138 kV

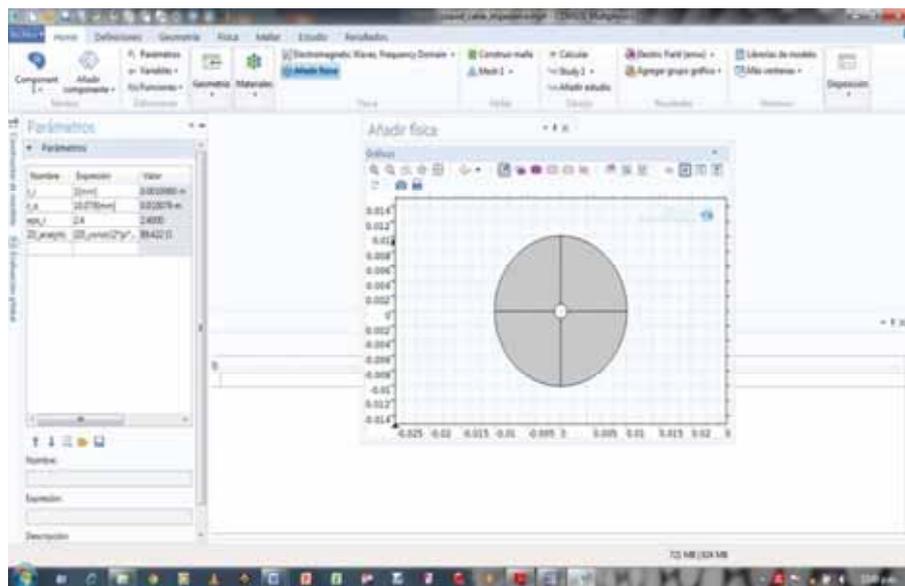


FIGURA 5.4.Introducción de parámetros

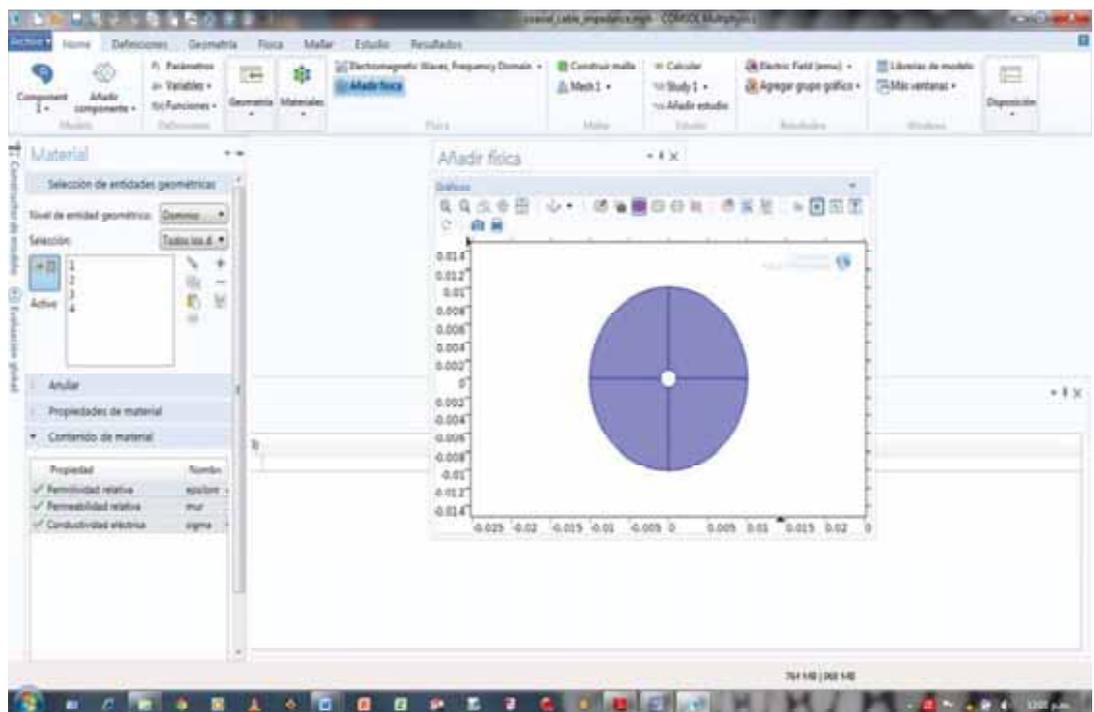


FIGURA 5.5.Introducción del material

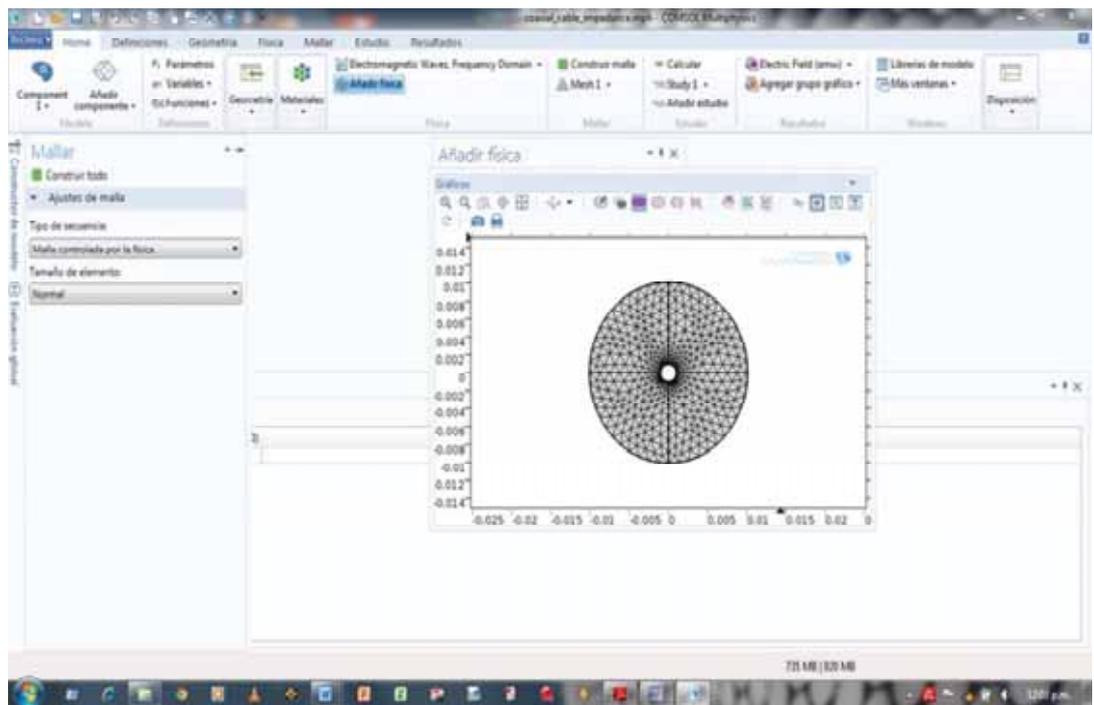


FIGURA 5 6. Aplicación de la malla

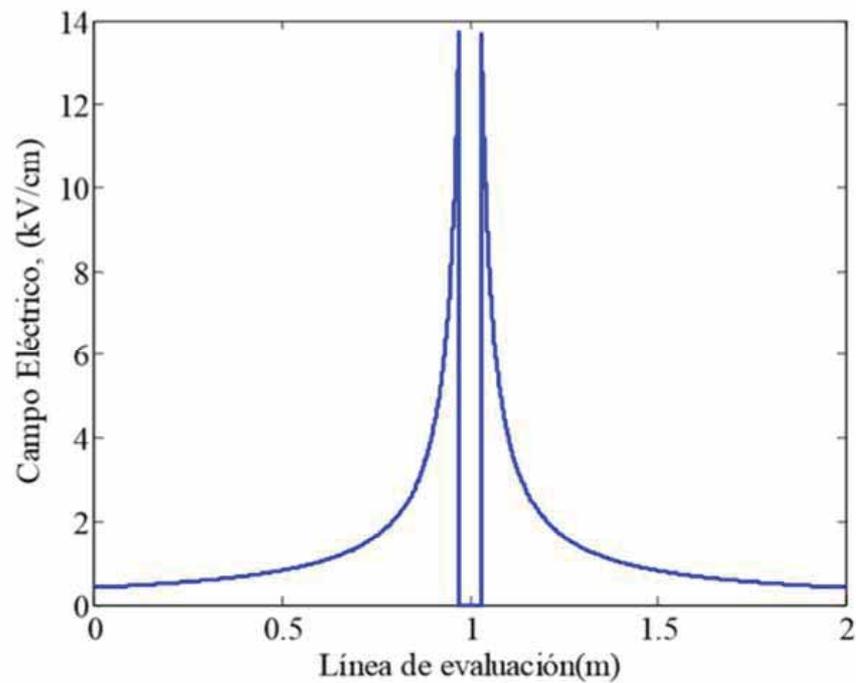


FIGURA 5 7. Intensidad de campo eléctrico en un conductor.

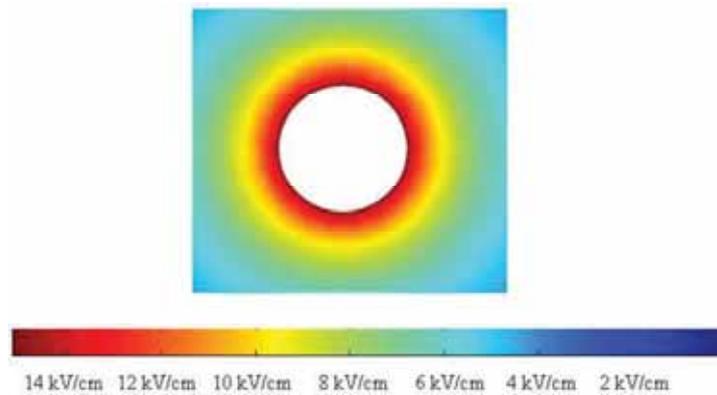


FIGURA 5 8. Distribución del campo eléctrico alrededor de un conductor.

También se realizaron simulaciones para un haz de 2 y otro de 4 conductores mediante el mismo análisis que en el caso anterior. Las características de las configuraciones y la distribución de las líneas equipotenciales se muestran en las Figuras 5.9 y 5.16. De igual forma al caso anterior, se trazó una línea de evaluación que pasa por el centro de los conductores, sobre la cual se calculó la intensidad del campo eléctrico. En la Fig. 5.14 se presenta la curva obtenida para un haz de 2 conductores, observando que la mayor intensidad de campo eléctrico se encuentra en la superficie externa del haz de conductores, con un valor de alrededor de 15 kV/cm aun cuando el radio de los subconductores es considerablemente menor que en el caso anterior de un conductor único. En la Fig. 5.20 se observa la curva obtenida para un haz de 4 conductores; en este caso la intensidad de campo eléctrico máxima en la superficie externa del haz de conductores es de alrededor de 12 kV/cm, aunque se utilizaron conductores de menor radio que en el haz de 2 conductores.

Finalmente, en las Figuras 5.15 y 5.21 se presentan las distribuciones del campo eléctrico para un haz de 2 y un haz de 4 conductores respectivamente, notándose que las mayores intensidades se encuentran en la superficie externa de los conductores.

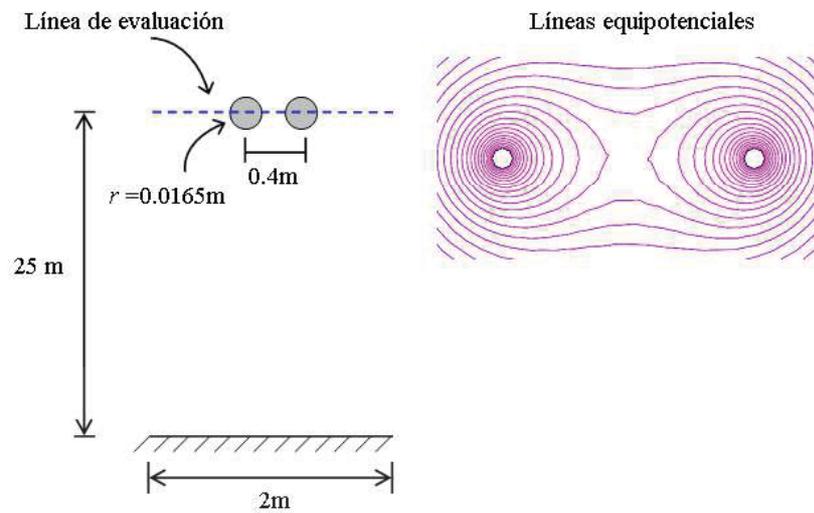


FIGURA 5 9.Líneas equipotenciales alrededor de un haz de 2 conductores energizados con 138 kV.

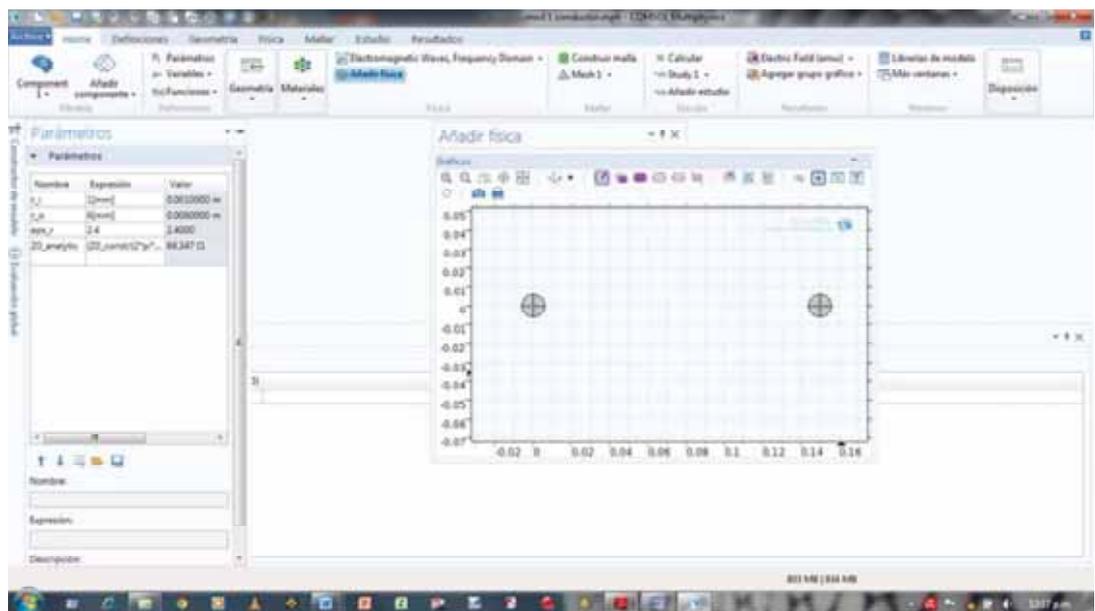


FIGURA 5 10.Introducción de parámetros

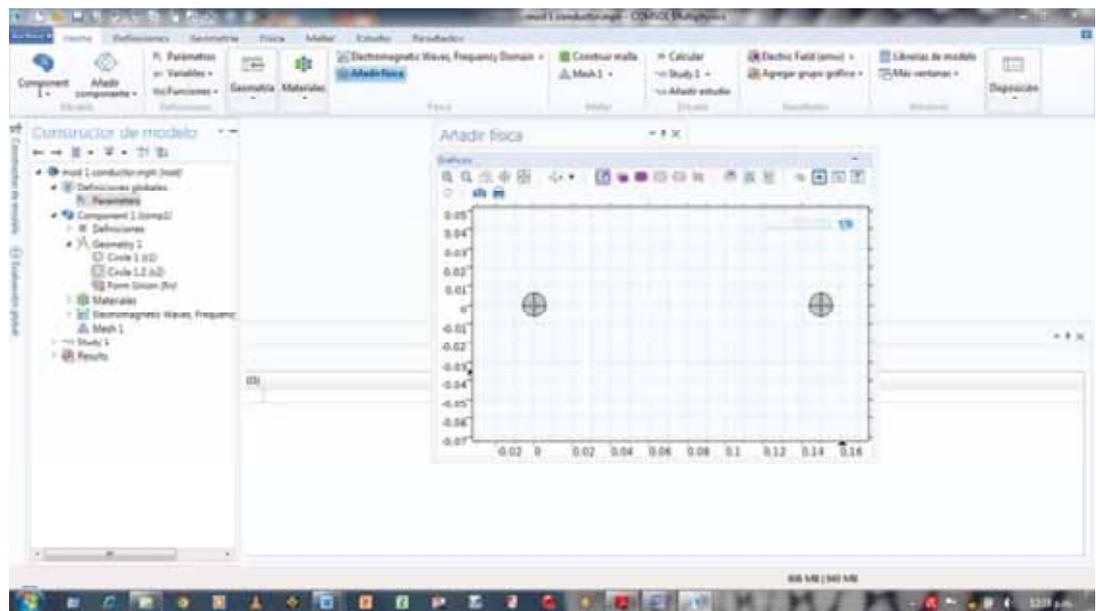


FIGURA 5 11.Dimensionamiento del modelo

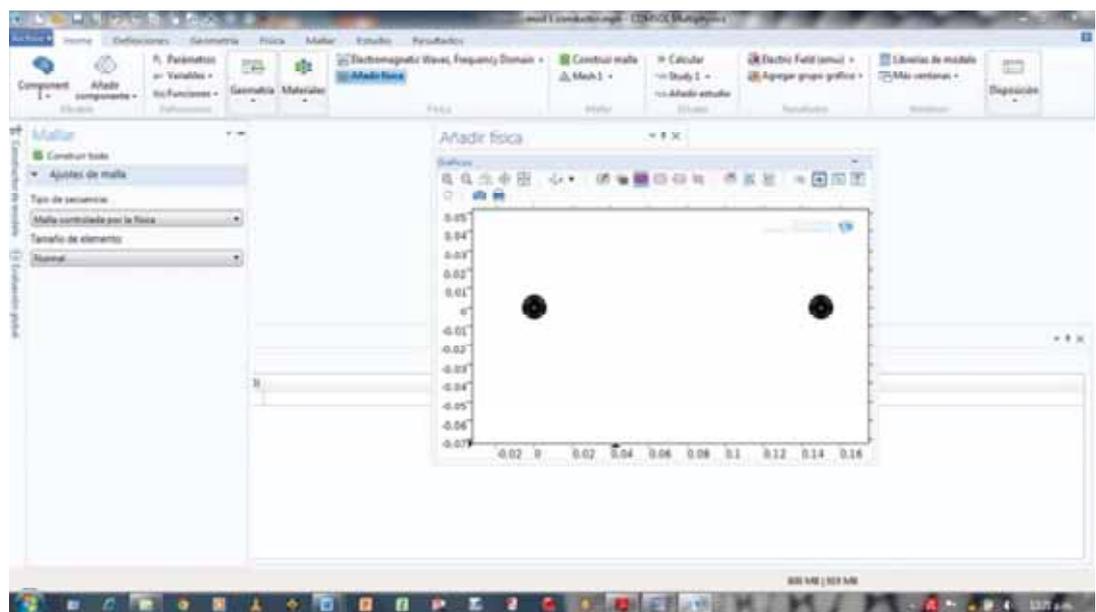


FIGURA 5 12.Aplicación de la malla

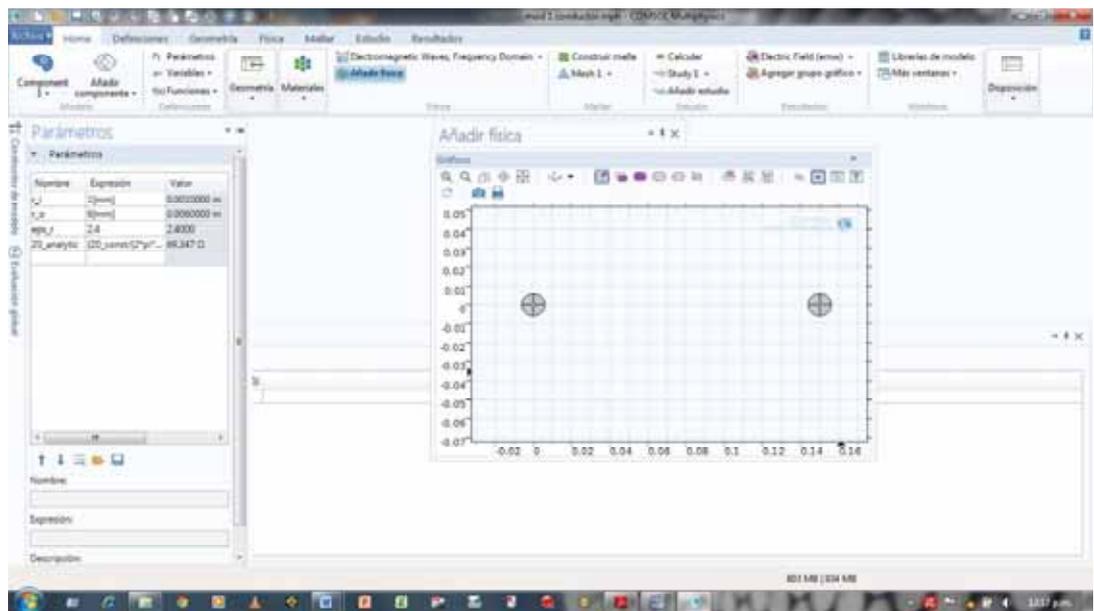


FIGURA 5 13.Determinación del campo eléctrico

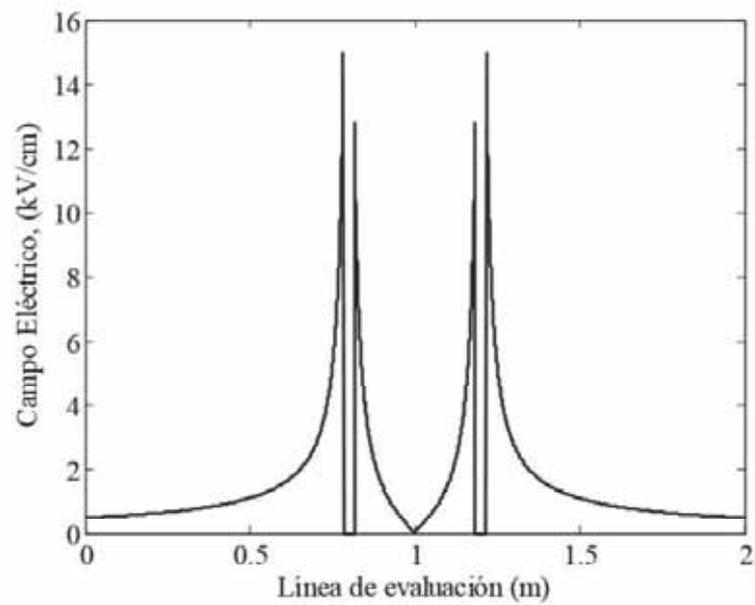


FIGURA 5 14.Intensidad de campo eléctrico en un haz de 2 conductores.

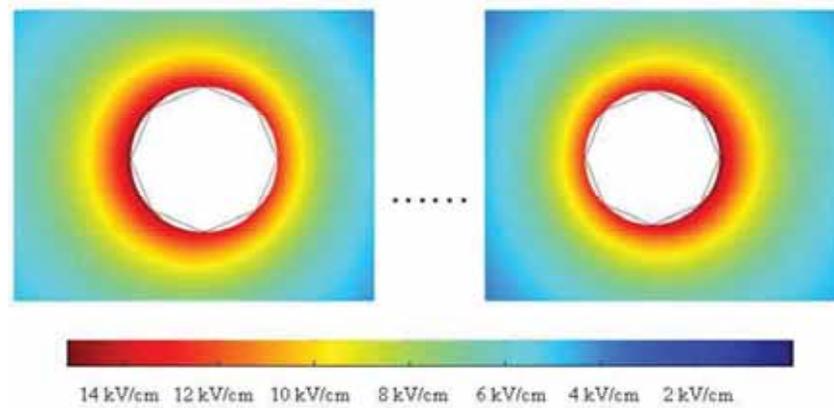


FIGURA 5 15. Distribución del campo eléctrico alrededor de un haz de 2 conductores.

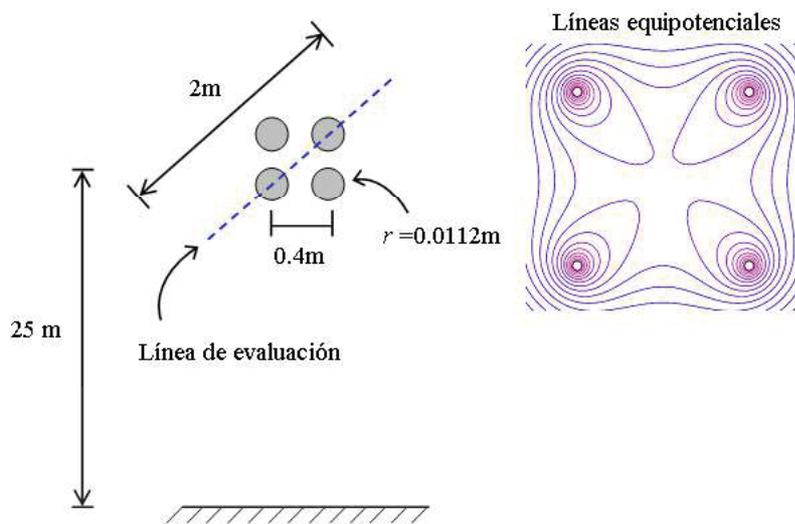


FIGURA 5 16. Líneas equipotenciales alrededor de un haz de 4 conductores energizados con 138 kV.

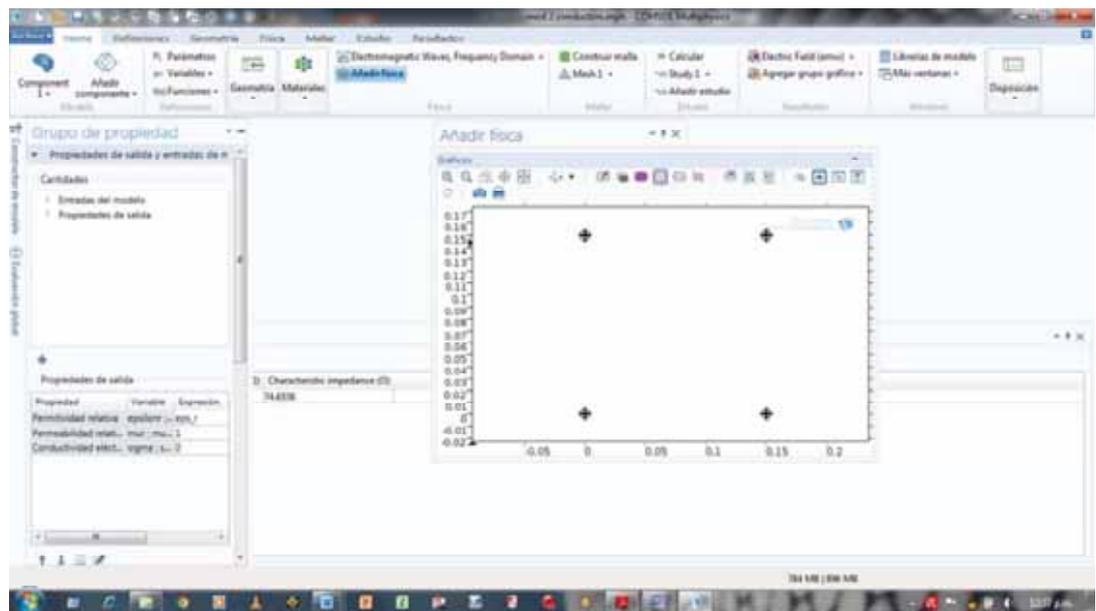


FIGURA 5 17.Determinación de propiedades

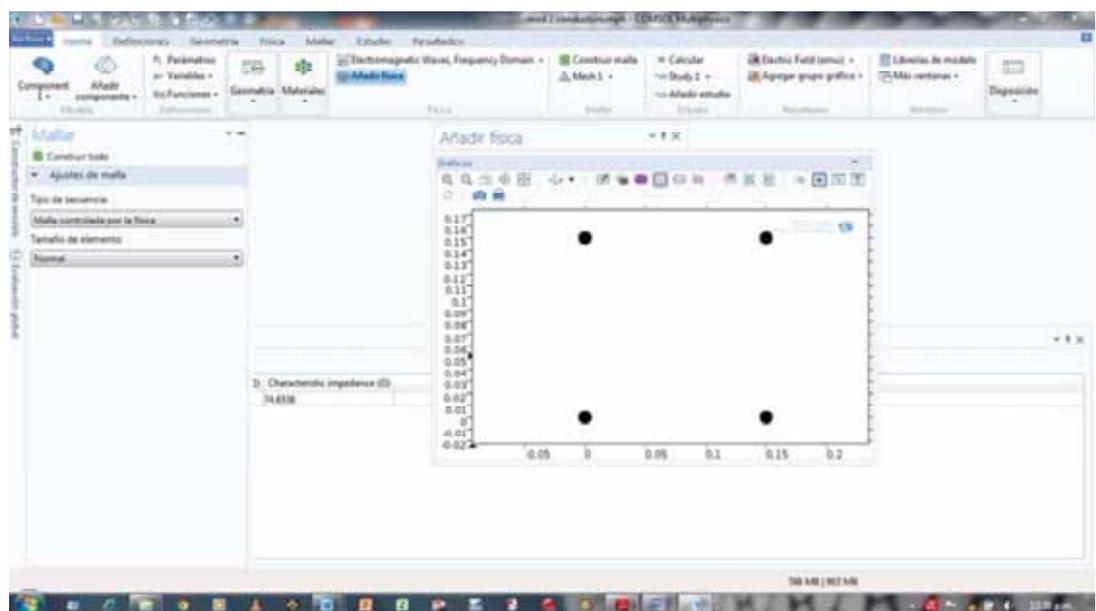


FIGURA 5 18.Aplicación de la malla

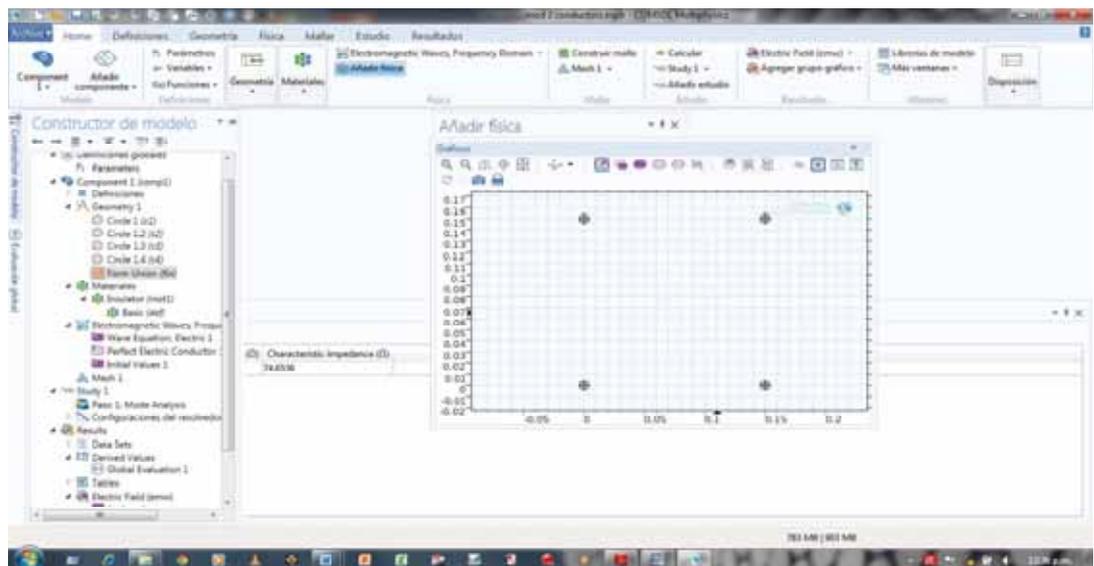


FIGURA 5 19.Determinación del campo eléctrico

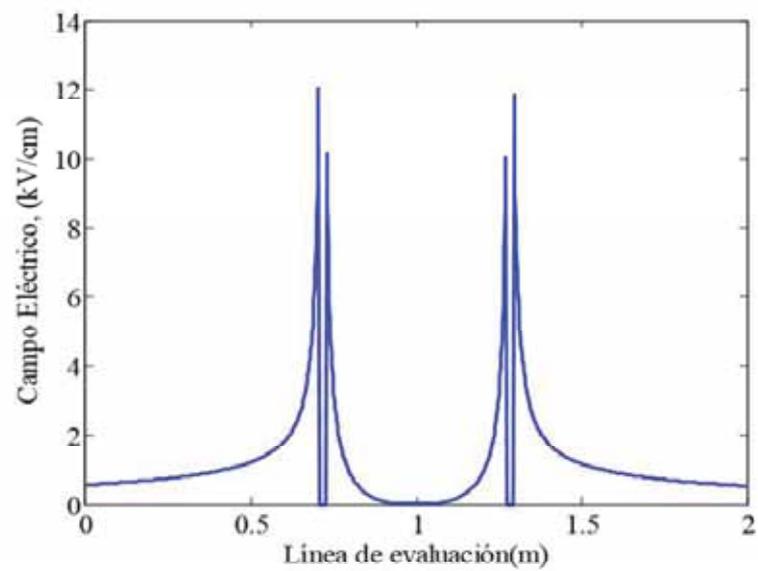


FIGURA 5 20.Intensidad de campo eléctrico en un haz de 4 conductores.

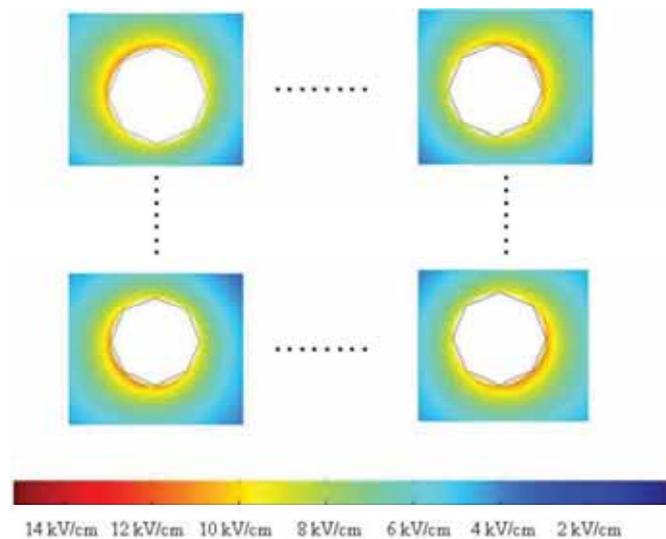


FIGURA 5.21. Distribución del campo eléctrico alrededor de un haz de 4 conductores.

5.6 APLICACIÓN DE CRITERIOS PARA LA ATENUACIÓN DE NIVELES DE RI.

Como se ha mencionado anteriormente, a fin de reducir el campo eléctrico superficial en los conductores, generalmente lo que se hace es aumentar el radio de los mismos. Analizando la Tabla 5.1 se observa que el radio equivalente de un haz de conductores aumenta conforme el espaciamiento entre subconductores sea mayor, y también conforme el número de subconductores por fase aumente.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al considerar la variación en el espaciamiento entre subconductores lo cual a su vez modifica el radio del haz, y también al utilizar mayor cantidad de subconductores por haz, con el fin de atenuar los perfiles de radiointerferencia generados por la línea de transmisión.

5.6.1 VARIACION EN EL ESPACIAMIENTO ENTRE SUBCONDUCTORES

Para este caso se considera una línea de 400 kV, cuyos datos y configuración geométrica se presentaron en la sección 5.3.1, Ejemplo 2. Aplicando el método descrito en el Capítulo V para la predicción de niveles de RI, se realizaron simulaciones para el cálculo de perfiles de RI utilizando diferentes espaciamientos en un rango de 0.1 m a 1 m.

En la Fig. 5.22 se presentan los diferentes perfiles obtenidos para 6 valores de

espaciamiento entre subconductores. Se puede observar que los menores perfiles de RI se obtienen con espaciamientos entre 0.2 y 0.4 m, pero si se sigue aumentando el radio de haz, los perfiles también lo hacen.

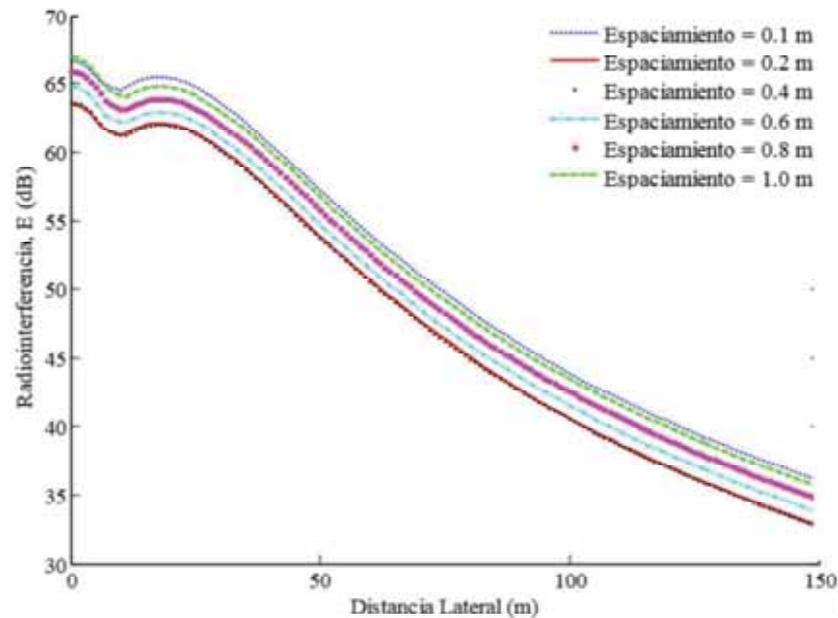


FIGURA 5 22. Perfil de RI de una línea de 400 kV para diferentes espaciamientos entre subconductores.

Se realizó el mismo análisis para un total de 5 líneas diferentes, las cuales se estuvieron empleando en los ejemplos de aplicación de la sección 5.3. Los datos y características geométricas también se pueden observar en la misma sección. En este caso, se realizaron simulaciones para el cálculo de niveles de RI a una distancia de 50 m desde la fase central de las líneas utilizando diferentes espaciamientos entre subconductores.

En la Tabla 5.2 y Fig. 5.23 se presentan los resultados obtenidos. Se observa que existe un cierto rango de valores de espaciamiento en los cuales se presentan los menores niveles de RI, en general entre 0.2 y 0.3 m; no obstante, a partir de cierto punto, al ir aumentando la distancia de espaciamiento entre subconductores, también aumentan los perfiles de RI. Lo anterior muestra que un aumento

excesivo en el espaciamento entre subconductores puede ser contraproducente desde el punto de vista de radiointerferencia, por lo cual se tiene que seleccionar la distancia óptima entre los mismos. Este fenómeno se vuelve más evidente a medida que la tensión incrementa como se puede apreciar en la Fig. 5.23.

TABLA 5 2.Comparaciones de Niveles de RI variando el espaciamento entre subconductores para diferentes líneas a una distancia de 50 m.

Espaciamento entre subconductores (m)	Línea de 138 kV RI (dB)	Línea de 380 kV RI (dB)	Línea de 400 kV RI (dB)	Línea de 500 kV RI (dB)	Línea de 750 kV RI (dB)
0.1	50.80	56.61	56.72	65.42	70.80
0.2	48.50	53.30	53.22	59.34	65.02
0.3	48.12	53.35	52.79	58.31	64.31
0.4	49.59	53.83	53.02	58.51	64.75
0.5	49.26	54.41	53.49	59.12	65.57
0.6	50.70	55.00	54.00	59.88	66.61
0.7	50.80	55.57	54.52	60.69	67.48
0.8	50.92	56.11	55.02	61.50	68.44
0.9	51.50	56.62	55.50	62.31	69.39
1.0	52.61	57.10	55.97	63.09	70.30

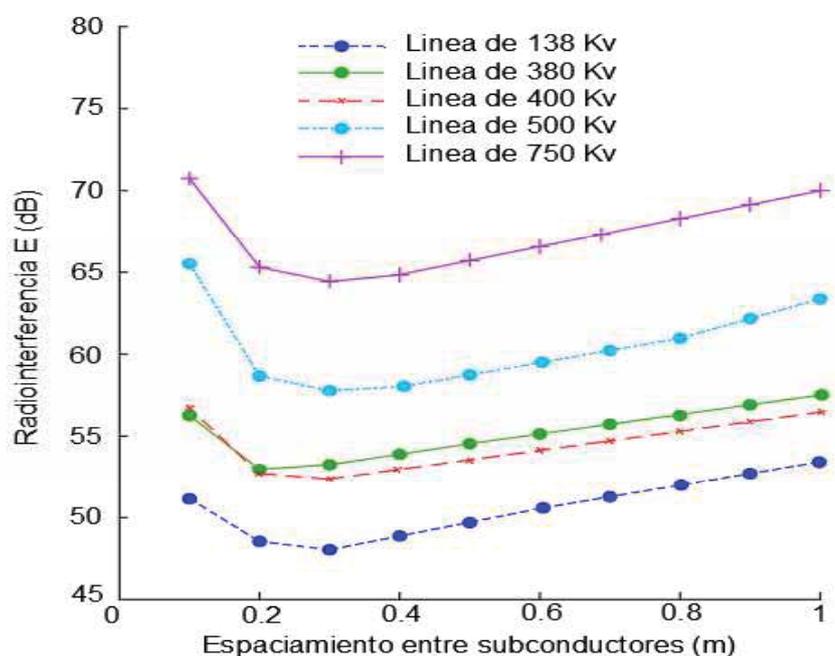


FIGURA 5 23.Niveles de RI en función del espaciamento entre subconductores de haz.

5.6.2 VARIACION EN EL NUMERO DE SUBCONDUCTORES

Otra de las maneras de aumentar el radio equivalente de un haz de conductores con el fin de disminuir los niveles de radiointerferencia generados por una línea de transmisión, es mediante el aumento de subconductores por fase. Nuevamente se emplea una línea de 400 kV para analizar el comportamiento de los perfiles de radiointerferencia con respecto al número de subconductores por haz. Los datos y configuración geométrica de la línea en cuestión se presentaron en la sección 5.3.1, Ejemplo 2.

En este caso, se obtuvieron los perfiles de RI variando el número de subconductores por fase desde 1 hasta 4. Generalmente, conforme el número de subconductores aumente, se tienden a utilizar radios menores, pero aun así el radio equivalente del haz irá aumentando. En la Tabla 5.3 se muestran los datos utilizados en cada una de las simulaciones, así como los resultados obtenidos como lo son los gradientes eléctricos para cada una de las fases, así como los niveles de radiointerferencia generados a una distancia de 50 m a partir de la fase central de la línea. En la Fig. 5.24 se observan los diferentes perfiles de RI para diferentes tipos de haz. Como se puede observar, conforme el número de subconductores aumente, los niveles de RI disminuirán. El cambio más notorio se observó en los perfiles para 2 y 3 subconductores por haz, ya que utilizando 3 subconductores se tiene un perfil de 8 decibeles menos que utilizando 2 subconductores.

TABLA 5.3. Niveles de RI de una Línea de Transmisión de 400 kV a 50 m de la fase central, con diferentes números de subconductores.

Número de subconductores	Radio Sub Conductor (m)	Espaciamento Entre subconductores	Radio Equivalente (m)	Gradiente eléctrico kV/cm			RI (dB)
				Fase A	Fase B	Fase C	
1	0.0295	-	0.0295	12.5608	13.3757	12.5608	54.77
2	0.0165	0.4	0.081	14.5274	15.6909	14.5274	53.02
3	0.0144	0.4	0.132	12.7238	13.8685	12.7238	44.69
4	0.0112	0.4	0.178	13.0422	14.3109	13.0422	42.08

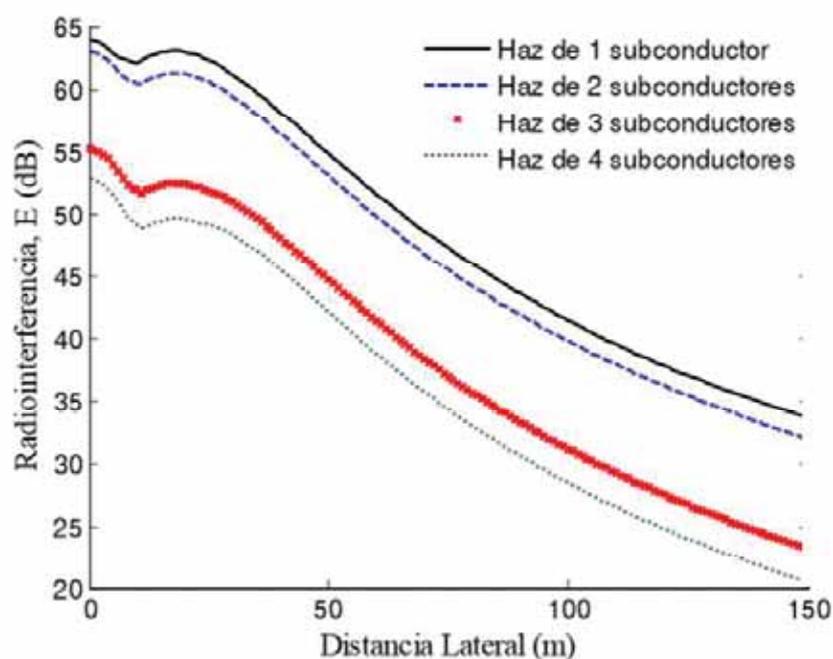


FIGURA 5 24. Perfil de RI de una línea de 400 kV en función del número de subconductores por haz.

En las Figuras 5.25 y 5.26 se muestran los resultados obtenidos para dos líneas más, una de 138 kV y otra de 500 kV. Los datos de los conductores y resultados de los perfiles de RI se aprecian en la Tabla 5.4. Los datos acerca de las configuraciones geométricas para ambas líneas se presentaron en la sección 5.3.

TABLA 5 4. Datos y Niveles de RI a 50 m de la fase central, con diferente número de subconductores.

Tensión Kv	Número de conductores por haz	Radio Subconductor (m)	Espaciamiento entre subconductores (m)	Radio Equivalente (m)	Gradiente eléctrico kV/cm			RI (dB)
					Fase A	Fase B	Fase C	
138	1	0.0223	-	0.0223	15.4782	15.7993	15.8748	60.94
138	2	0.0138	0.45	0.0788	17.0192	17.4513	17.5157	59.15
138	3	0.0112	0.45	0.1314	16.1567	16.6091	16.6563	53.79
500	2	0.0223	0.45	0.1002	15.8279	14.9588	16.1363	65.73
500	3	0.0147	0.45	0.1439	17.6529	16.5754	18.0076	64.53
500	4	0.0112	0.45	0.1949	18.6523	17.4002	19.0371	63.05

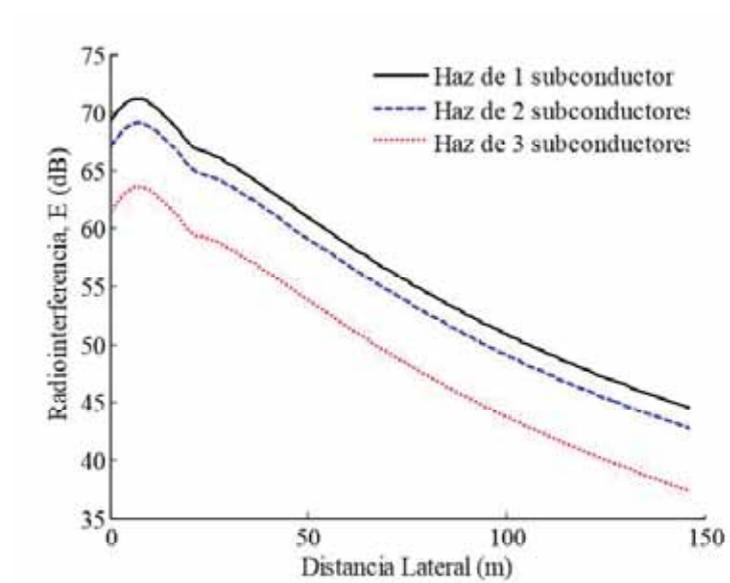


FIGURA 5 25. Perfil de RI de una línea de 138 kV en función del número de subconductores por haz.

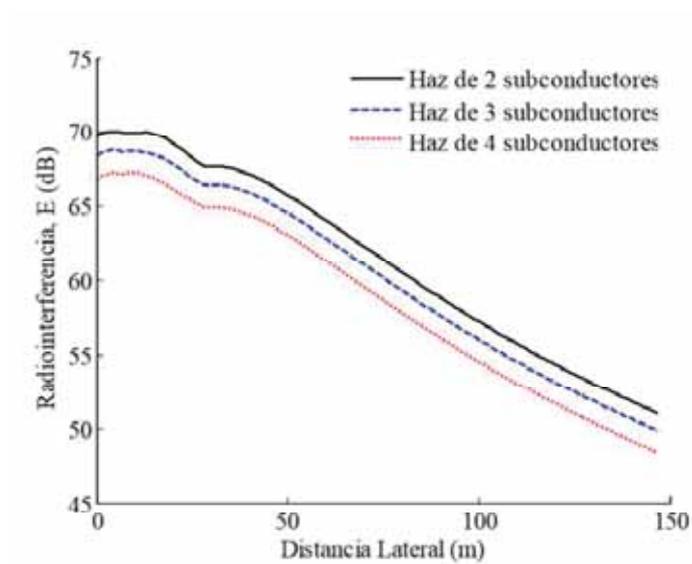


FIGURA 5 26. Perfil de RI de una línea de 500 kV en función del número de subconductores por haz

5.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de visualizar la distribución del campo eléctrico en la vecindad de diferentes arreglos de conductores en haz, se utilizó el programa COMSOL Multiphysics mediante el cual se realizaron simulaciones para obtener las intensidades de campo eléctrico en la superficie de los conductores y el comportamiento de las líneas equipotenciales.

Para los arreglos de 1 y 2 conductores en haz, se obtuvieron intensidades de campo eléctrico de 14 y 15 kV/cm respectivamente; sin embargo, debe tomarse en cuenta que el radio utilizado en el haz de 2 conductores es mucho menor que el utilizado en la simulación de un solo conductor, ya que en la práctica mientras el número de conductores por fase de una línea de transmisión aumenta, los radios de los mismos suelen disminuirse. La ventaja de utilizar el haz de 2 conductores radica principalmente en el incremento del SIL, manteniendo la intensidad de campo eléctrico por abajo del valor máximo recomendado. La reducción de la intensidad del campo eléctrico en la superficie de los conductores se hizo más evidente en el arreglo de 4 conductores por haz; descendió a 12 kV/cm.

Se aplicaron dos técnicas para la reducción de la intensidad del campo eléctrico en la superficie de los conductores de una línea de transmisión, y en consecuencia los perfiles de radiointerferencia debidos al efecto corona. Una de esas técnicas fue la variación del espaciamiento entre subconductores, en donde se mostró que el espaciamiento óptimo para las 5 líneas estudiadas se encuentra en 0.2 y 0.3 m. No obstante, si el espaciamiento aumenta, los niveles de radiointerferencia también lo hacen, por lo cual es necesario seleccionar adecuadamente el valor del espaciamiento para cada caso en particular. A medida que la tensión de la línea aumenta, el efecto del espaciamiento entre subconductores se vuelve más crítico.

Por otro lado, al aumentar el número de conductores por fase se logra obtener atenuaciones de radiointerferencia más significativas. Para el caso de la línea de 400 kV, el cambio más notorio se observó en los perfiles de 2 a 3 subconductores por haz, ya que utilizando 3 subconductores se logró minimizar 8 decibeles con respecto al perfil obtenido con 2 subconductores. En el caso de la línea de 345 kV, la atenuación más significativa también se observó en los perfiles de 2 a 3 subconductores por haz, con una reducción de alrededor de 6 dB. Finalmente, para la línea de 500 Kv, la atenuación de los perfiles de radiointerferencia de 2 a 3 y de 3 a 4 subconductores fue de

solamente 2 dB. Esto puede deberse al tipo de configuración de conductores (vertical) en este caso.

CONCLUSIONES

1. En el desarrollo del tercer capítulo se identificaron los parámetros eléctricos y mecánicos en base a los datos de la empresa concesionaria y la información obtenida directamente en la zona que corresponde al Tramo Quencoro-Combapata. Para tal efecto se consideraron las características eléctricas y mecánicas de los cables de energía, cables de guarda, datos que nos permitieron calcular la Resistencia Eléctrica, Reactancia Inductiva, Impedancia Serie Unitaria, Impedancia Secuencia cero, Impedancia paralela unitaria e Impedancia Característica, Perdidas por Corona, Campo Eléctromagnético, y la medición de la RI mediante un analizador digital de radiointerferencias (RIV), asimismo los perfiles de Radiointerferencia con el método computacional desarrollado.
2. En este estudio se ejecutó un método basado en el de Gary (Método 1). Para la evaluación de los niveles de Radiointerferencia (RI) causadas por líneas de transmisión de alta tensión con efecto corona. En el procedimiento de Gary se utilizan constantes de atenuación promedio exclusivamente para configuraciones de línea horizontal y triangular, igualmente para desacoplar el régimen trifásico se emplean modos de Clarke. Por otro paraje, en la ejecución del método planteado en este estudio (Método 2), las constantes de atenuación se logran a partir de los parámetros de la línea.
Sin embargo, existen instrumentos de medición para calcular los niveles de RI. La práctica de herramientas computacionales nos permitió vaticinar la radiointerferencia que generará una línea que todavía no se ha instalado, esto con la finalidad de apartar en consideración estas radiaciones en el diseño de líneas de transmisión. Conjuntamente, si fuese indefectible instalar líneas de comunicación aproximadas a la línea de potencia, se puede precisar las distancias certeras de instalación para eludir perturbaciones en las señales de comunicación.
3. Los ejercicios de aplicación muestran que en ciertos casos los resultados de uno y otros métodos pueden adquirir diferencias considerablemente significativas, las cuales van acrecentándose acorde aumenta la distancia lateral de la línea. Lo preliminar señala que las suposiciones realizadas con el método de Gary (método 1), pueden inducir resultados erróneos. Los cotejos anteriormente trabajados con las 5 mediciones a diferentes líneas de transmisión, demuestran que los cambios hechos al método de Gary en la operación de las constantes de atenuación y

descomposición modal, indican mejores resultados. Consecuentemente comparando los gráficos en la parte teórica de los ejemplos mostrados, es semejante la información que se obtuvo por el método computacional expuesto, validando de este modo la tarea presentada.

4. Dado que el campo eléctrico en la periferia de la línea es el factor determinante en la visión del efecto corona, se pretendió acrecentar el radio equivalente de las líneas en haz para que sucesivamente se mitigaran los perfiles de RI. Se emplearon dos técnicas para obtener lo anterior; una de ellas fue alterar las distancias entre subconductores de haz, en donde se visualizó que se tiene que elegir cuidadosamente la distancia ideal ya que con espaciamientos muy estrechos o muy largos, se tienen aumentos en los perfiles de radiointerferencia. Por otro lado, con el incremento de conductores por fase, se logra mitigar notablemente los perfiles de RI del conductor de transmisión.

Debido a que actualmente la ciencia en las comunicaciones a altas frecuencias ha venido evolucionando notoriamente, se ha visto la obligación de contar con instrumentos para la obtención de los niveles de radiointerferencia que ocasiona una línea de transmisión, con el fin de determinar distancias certeras de montajes de líneas de comunicación y dispositivos electromagnéticos que pueden ser aquejados debido a la interferencia electromagnética originada por efecto corona en líneas de alta tensión.

Se examinó el efecto de la alteración del número de conductores por haz y espaciamiento entre subconductores, en los perfiles de radiointerferencia de la línea. Con lo previo fue viable cuantificar los niveles de radiointerferencia que pueden ser mitigados aplicando estos métodos. Se da a conocer una distancia óptima para la división entre subconductores.

En el afán de reducir los perfiles de RI, y teniendo en cuenta que existen algunos programas computacionales que calculan estos parámetros (RI) como es Comsol Multiphysics, sin embargo, debido al poco conocimiento en nuestro medio los alcances que se obtubieron fueron limitados, pero a nuestro entender respaldan la aplicación del método propuesto.

RECOMENDACIONES

1. Efectuar las adaptaciones precisas al método mostrado de este trabajo, con la meta de utilizarlo para la medición de perfiles de RI de líneas de transmisión de alta tensión en configuración de circuito doble y en el sistema HVDC. Confrontar los cálculos conseguidos con las evaluaciones experimentales para este modelo de líneas
2. Plantear diferentes métodos para la atenuación de radiointerferencia producida por líneas de alta tensión en CA y CD, a través del análisis de la influencia del número de conductores por fase, distancia entre fases y altura sobre el nivel de suelo, tipos de conductores, también se puede analizar otros tipos de atenuación (blindaje en conductores). Examinar las normativas que reglamentan las emisiones de radiointerferencia.
3. Estudiar los efectos de campos electromagnéticos de baja frecuencia producidos por líneas de transmisión. Asimismo, indagar las normas que regulan este tipo de emisiones y plantear blindajes con los materiales adecuados para mitigar los mencionados campos, hasta los niveles aceptados por las normas.

BIBLIOGRAFÍA

- ABB, R. (2007). Transmisión de ultra alta tensión.
- B.SC.A, Y. L. (1993). Contribution A L'etude De L'Influence Des Decharges De Couronne Sur La Perte De Volume D'une Asperite De Glace Portee A Un Potentiel Eleve.
- Barrera, G. (1954). Línea de transmisión a 64 KV Moyopampa - Lima." Electrotécnica.
- Buenaventura Ronquillo, J. (2011). Perdidas Por Efecto Corona En La Linea De Transmision De 500 kV. Quito-Guayaquil.
- Checa, L. M. (1988). Líneas de Transporte de Energía, 3ra edición, Editorial Marcombo. Barcelona España.
- COMSOL. (2005). Reference Manual. COMSOL AB.
- COMSOL. (2005). User's Guide and Introduction. COMSOL AB.
- F. Kiessling, P. N. (2003). Overhead Power Lines, Springer- Verlag. Germany .
- Follia, J. (1982). Revisión de Procedimientos de Cálculo de Radio-Interferencia Producido por Líneas de E.A.T.
- Gary, C. H. (1971). The Theory of the Excitation Function: A Demonstration of its Physical Meaning", IEEE Winter Power Meeting. New York.
- Heredia-Rojas, J. A. (2003). Los campos electromagnéticos:¿ un problema de salud pública?
- J. J. Grainger, W. D. (1996). Análisis de Sistemas de Potencia. Editorial McGRAW – HILL.
- Jacome, A. (s.f.). Sistema Eléctrico de Potencia Historia de Desarrollo Electrico.
- Jewell-Larsen, N. E. (2004). Optimization and Miniaturization of Electrostatic Air Pumps for Thermal Management, University of Washington. Washington.
- LaForest, J. J. (1981). Transmission Line Reference Book 345 kV and Above, Second Edition, Electric.
- M. R. Moreau, C. H. (1971). Predetermination of the Radio-Interference Level of High Voltage Transmission Lines. II – Field Calculating Method", IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing, Portland, Ore.
- Maruvada, P. S. (2000). Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines, Research Studies Press Ltd. England.
- Nasser, E. (1971). Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics. Wiley-Interscience.
- Osorio, N. M. (2006). Fenómeno Corona En Líneas Aéreas.
- Project, T. (1989). Environmental Analysis of the Changes to the Proposed Mead-Phoenix .
- R. G. Olsen, S. D. (1992). Comparison of Several Methods for Calculating Power Line Electromagnetic Interference Levels and Calibration with Long Term Data", IEEE Transactions on Power Delivery.

- Rico-Melgoza, J. A.-G. (s.f.). cfe. gob. mx. Obtenido de [http://www.cfe.gob.mx/es/La Empresa/Transmision y distribucion](http://www.cfe.gob.mx/es/La_Empresa/Transmision_y_distribucion).
- Rodriguez, V. (1972). CISPR Publication No. 1, Specifications for CISPR Radio Interference Measuring Apparatus for the Frequency Range.
- Siegert, A. (1988). Alta Tensión y Sistemas de Transmisión.
- Sinha, J. N. (1997). Studies on corona power loss and radio interference under different electrode configurations. IEEE 1997 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena .
- Tejada Martinez, C. (2008). Analisis de la Interferencia Electromagnetica Por Efecto Corona En Lineas de Transmision de Alta Tension En CA. Mexico D.F.
- Valdoc, F. (2001). Electronica. Peru.
- Vázquez, A. I. (1998). Transitorios Electromagnéticos en Líneas de Transmisión considerando Parámetros dependientes de la Frecuencia y Efecto Corona. Guadalajara.
- Wolfenson. (s.f.).
- Wunenburger. (s.f.).
- Y.Nakano, Y. S. (1990). Availability of Corona Cage for Predicting Radio Interference Generated from HVDC.

ANEXOS

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN
<p>FORMULACION DEL PROBLEMA</p> <p>Aunque existen instrumentos de medición de radiointerferencia, las herramientas computacionales son de gran utilidad para predecir los niveles de ruido electromagnético que generaría una línea aun no instalada. Lo anterior sería de gran utilidad para diseñar la línea de tal forma que se tengan los menores perfiles de radiointerferencia posibles. Por tal motivo, y con el fin de aumentar la confiabilidad de las herramientas computacionales de los sistemas convencionales, es necesario desarrollar métodos de cálculo cada vez más precisos y que tomen en consideración las características de la línea en particular.</p>	<p>OBJETIVO GENERAL</p> <p>Desarrollar la aplicación de un método de análisis de líneas de transmisión en presencia del efecto corona, considerando el efecto skin en los conductores.</p>	<p>HIPOTESIS GENERAL</p> <p>El desarrollo de la aplicación de un método de predicción de perfiles de la radiointerferencia causados por las ondas electromagnéticas producidas por las líneas de transmisión, permitirá formular los criterios de mitigación de la radiointerferencia.</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">CAPITULO I FORAMULACION DE LA TESIS</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">CAPITULO II MARCO TEORICO</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">CAPITULO III IDENTIFICACION DE LOS PARAMETROS ELECTRICOS DEL TRAMO QUENCORRO - TINTAYA</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">CAPITULO IV METODO DE PREDICION DE PERFILES DE RADIO INTERFERENCIA</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">CAPITULO V EVALUACION DE TECNICAS DE ATENUACION DE RI</div>
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS	CONCLUSIONES
<p>En resumen podemos decir que: los niveles elevados de las tensiones de transmisión de las líneas cuyos recorridos atravesen altitudes superiores a los 2500 msnm, y zonas donde haya enriquecimiento del aire o contaminación ambiental, hacen que se manifieste el efecto corona con la consecuente presencia de la radiointerferencia mayor a lo establecido en la norma.</p>	<p>a. Identificar los parámetros eléctricos de la línea de transmisión Quencorro - Tintaya.</p> <p>b. Desarrollar la aplicación del método de análisis de la interferencia electromagnética por efecto corona en líneas de transmisión de alta tensión en CA.</p> <p>c. Validar la precisión del método desarrollado.</p> <p>d. Evaluar distintas técnicas para la atenuación de radiointerferencia.</p>	<p>a. La identificación de los parámetros eléctricos de la línea de transmisión permitirá identificar sus valores.</p> <p>b. La utilización de funciones de excitación permitirá el cálculo de la intensidad de las corrientes de corona, calcular la intensidad de campo eléctrico y magnético resultantes en la vecindad de la línea, desarrollar el método de predicción y concluir con el cálculo de la radiointerferencia.</p> <p>c. El comparar los resultados obtenidos con otros, publicadas por algunos autores, permitirá validar el presente trabajo.</p> <p>d. La simulación del efecto corona mediante el uso de software especializado, permitirá predecir la existencia o no, de los perfiles de radiointerferencia.</p>	<p>1. En el desarrollo del tercer capítulo se identificaron los parámetros eléctricos y mecánicos en base a los datos de la empresa concesionaria y la información obtenida directamente en la zona que corresponde al Tramo Quencorro-Combapata. Para tal efecto se consideraron las características eléctricas y mecánicas de los cables de energía, cables de guarda, datos que nos permitieron calcular la Resistencia Eléctrica, Reactancia Inductiva, Impedancia Serie Unitaria, Impedancia Secuencia cero, Impedancia paralela unitaria e Impedancia Característica, Perdidas por Corona, Campo Electromagnético y la medición de la RI mediante un analizador digital de radiointerferencias (RIV), asimismo los perfiles de Radiointerferencia con el método computacional desarrollado.</p> <p>2. En este estudio se ejecutó un método cimentado en el de Gary (Método 1). Para la evaluación de los niveles de Radiointerferencia (RI) causadas por líneas de transmisión de alta tensión con efecto corona. En el procedimiento de Gary se utilizan constantes de atenuación promedio exclusivamente para configuraciones de línea horizontal y triangular, igualmente para desacoplar el régimen trifásico se emplean modos de Clarke. Por otro paraje, en la ejecución del método planteado en este estudio (Método 2), las constantes de atenuación se logran a partir de los parámetros de la línea.</p> <p>Sin embargo, existen instrumentos de medición para calcular los niveles de RI. La práctica de herramientas computacionales nos permitió vaticinar la radiointerferencia que generará una línea que todavía no se ha instalado, esto con la finalidad de apartar en consideración estas radiaciones en el diseño de líneas de transmisión.</p> <p>3. Los ejercicios de aplicación muestran que en ciertos casos los resultados de uno y otros métodos pueden adquirir diferencias considerablemente significativas, las cuales van acrecentándose acorde aumenta la distancia lateral de la línea. Lo preliminar señala que las suposiciones realizadas con el método de Gary (método 1), pueden inducir resultados erróneos. Los cotejos anteriormente trabajados con las 5 mediciones a diferentes líneas de transmisión, demuestran que los cambios hechos al método de Gary en la operación de las constantes de atenuación y descomposición modal, indican mejores resultados.</p> <p>4. Dado que el campo eléctrico en la periferia de la líneas es el factor determinante en la visión del efecto corona, se pretendió acrecentar el radio equivalente de las líneas en haz para que sucesivamente se mitigaran los perfiles de RI. Se emplearon dos técnicas para obtener lo anterior; una de ellas fue alterarlas distancias entre subconductores de haz, en donde se visualizó que se tiene que elegir cuidadosamente la distancia ideal ya que con espaciamientos muy estrechos o muy prolongados, se tienen aumentos en los perfiles de radiointerferencia.</p>
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	VARIABLES	METODOLOGÍA	
<p>Debido a la utilización de niveles de tensión cada vez mayores en las líneas de transmisión, la probabilidad de que se incremente el efecto corona es muy alta. Dicho fenómeno tiene como consecuencias principales las descritas a continuación: Interferencia en comunicaciones debido a que se presentan oscilaciones electromagnéticas de alta frecuencia en la vecindad de la línea de potencia, que coinciden con la frecuencia de alguna señal de comunicación sobre todo de las líneas telefónicas cercanas a las líneas de transmisión, estas señales van a ser distorsionadas, también se presentan otras consecuencias como las pérdidas de potencia, ruido audible, contaminación ambiental, generación de ozono, viento iónico, distorsión de ondas.</p>	<p>VARIABLES DEPENDIENTES.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Radiointerferencia. <p>VARIABLES INDEPENDIENTES.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nivel de tensión. • Densidad del aire. • Ruido audible. <p>VARIABLES INTERVIENTES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pérdidas de potencia • Calidad de recepción de señales de audio, radio comunicaciones, de televisión o de telecomunicaciones. <p>INDICADORES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nivel de interferencia (Db) • Tensión crítica disruptiva (Kv) • Porcentaje de pérdida de potencia (%) <p>Densidad del aire.</p>	<p>El estudio es de tipo descriptivo: Porque se ocupa de la descripción de datos y características de las líneas de transmisión. El objetivo es la adquisición de datos objetivos, precisos y sistemáticos, también es tipo analítico, porque consiste en la desmembración de un todo, descomponiéndolo en sus partes o elementos para observar las causas, la naturaleza y los efectos. Ya que posibilitara determinar los efectos producidos por la interferencia electromagnética en condiciones de operación de una línea de transmisión.</p>	

Correcciones y actualizaciones

Se agregó el proyecto: Línea transmisión en 500kV Mantaro-Caravelí-Montalvo y subestaciones.

Se agregó el proyecto: Línea transmisión en 220kV Cotaruse-Abancay-Surriray-Machu Pichu.

Correcciones en las salidas en 220kV de la Central hidroeléctrica Mantaro.

Ubicación georreferenciada de la CH Mantaro 7x114MW y la SE Campo Armiño.

Se agregó la línea en 220kV Campo Armiño – Cobriza I.

Se agregó la CH Ingenio 1,74MW (Concepción, Junín).

Se agregó la línea en 60kV Cajamarca-Celendín.

Se actualizaron las codificaciones de las líneas de acuerdo a la nueva leyenda del mapa, contemplando las líneas existentes y proyectadas.

Se agregó el Sistema Eléctrico Regional Bagua Jaén en 60 kV.

Se agregó la subestación Uchuchacua 138 kV.

Se modificó la ubicación de las subestaciones Paragsha 2, Paragsha 1 y Carhuamayo.

Se agregó la línea de transmisión en 138 kV Paragsha 2 – Uchuchacua.

Se modificaron las salidas en 220kV de la subestación Paragsha 2.

Se agregaron las subestaciones Pucallpa 138/60 kV, Yarinachocha y Pucallpa EUC.

Se corrigió el sistema eléctrico de transmisión en 60kV de Pucallpa.

Se agregó la línea de transmisión en 220kV Cajamarca Norte – Kiman Ayllu – Conococha.

Se agregaron las subestaciones Kiman Ayllu 220/138kV y Conococha 220kV.

Se agregaron las subestaciones Antamina 220/23kV y Huallanca Nueva 220/60/33 kV.

Se agregó la línea de transmisión en 220kV Vizcarra-Antamina.

Se agregaron las subestaciones Callahuanca 220kV y Pachachaca 220kV.

Se agregó la Hidroeléctrica Yanango 42MW y subestación 220/10kV.

Se agregó la Hidroeléctrica Chimay 2x75MW y subestación 220/13,8kV.

Se agregó la subestación Cantera 220kV.

Se agregó la subestación Cotaruse 220kV.

Se agregó la línea de transmisión en 220kV Montalvo-Ilo.

Se modificó la llegada de Chimbote-Trujillo Norte en 220kV.

Se agregó la subestación La Niña 220/138kV y Bayovar 138 kV.

Se agregó la línea de transmisión en 138kV La Niña-Bayovar.

Nuevos Proyectos

Se agregó el proyecto: Línea de transmisión en 500 kV Chilca-Marcona-Ocoña-Montalvo Nueva y subestaciones (Georreferenciado).

Se agregó el proyecto: Línea de transmisión en 220 kV Montalvo Nueva-Montalvo (Georreferenciado).

Se agregó el proyecto: Línea de transmisión en 220kV Carhuaquero-Cajamarca Norte y subestaciones.

Se agregó el proyecto: Línea de transmisión en 138kV Jaén-Bagua Grande-Cáclic y subestaciones.

Se agregó el proyecto: Línea de transmisión en 60kV Cutervo-Chota.

Utilizacion Del Software MATLAB para el cálculo y simulación de RI.

Calculo de Radiointerferencia por Efecto Corona para línea monofasica

```

%% Calculo de RadioInterferencia por Efecto Corona
clear all, close all, clc
% CASO MONOFASICO
mu0=4*pi*1e-7;%mu0
epsilon=8.8541878e-12; %permitividad del vacio
%Caracteristicas del Terreno
rhoT=923.864571; %Resistividad del Terreno Modificable
muT=mu0;
%Caracteristicas del Conductor
rhoC=0.0028834; %Resistividad del Conductor
muC=mu0;
%Caracteristicas de la Linea.
%Frecuencia
f=60;
nc=1; %numero de conductores por haz
R=10.079e-3;%radio del Haz
    w=2*pi*f;
    mu=mu0;
%Alturas de los Conductores en metros
h=18; %Modificable
%Distancias Horizontales de los conductores;
x=3.5; %Modificable

%Radios de los conductores
r=10.079e-3;

% Calculo de profundidad de Penetración:
P=sqrt (rhoT/ ((1j) *w*muT));

```

```

%Impedancia Geometrica
Zg=(1j)*w*mu0*log(2*h/r)/2/pi/r;
%Impedancia Debida a la Tierra;
Zt=(1j)*w*mu0*log(1+P/h)/2/pi;
%Delta para Zinterna
delta=sqrt(rhoC/((1j)*w*muC));
%Impedancia interna del Conductor
Rcd=rhoC/(pi*r^2); %resistencia en CD
Zhf=rhoC/(2*pi*r*delta); %impedancias a muy altas
frecuencias.
Zc=sqrt(Rcd^2+Zhf^2);
%Impedancia Total:
Z=Zg+Zt+Zc;

%C:
C=2*pi*epsilon/log(2*h/r);

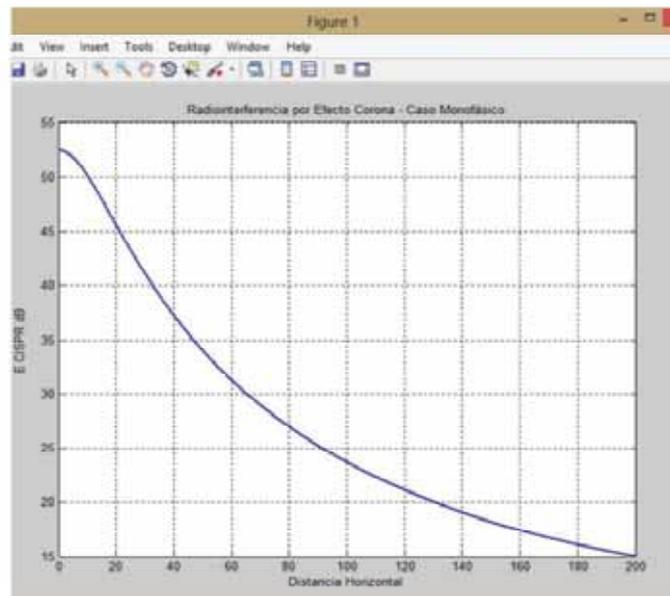
%Y:
Y=(1j)*w*C;

%Constante de atenuacion:
alpha=real(sqrt(Z*Y));

%Funcion de Excitación:
Vp=138; %Voltaje por fase en kV
q=C*Vp;
gavg=q./(2*pi*epsilon*r)/100/nc;
gm=gavg*(1+(nc-1)*r/R);
Gamma=-40.69+3.5*gm+6*2*r;
%Corriente Inducida
J=C*Gamma/(2*pi*epsilon);

%I
I=J/2/sqrt(alpha);
%
num=1000;
posicion=linspace(0,200,num);
H=I*(h./(h^2+posicion.^2)+(h+2*P)./
((h+2*P)^2+posicion.^2))/2/pi;
E=120*pi*H;
E=abs(E);
E=20*log(E)/log(10);
E=E+1.5;
% Grafica
plot(posicion,E,'LineWidth',2);
title('Radiointerferencia por Efecto Corona - Caso
Monofásico')
ylabel('E_CISPR dB')
xlabel('Distancia Horizontal')
grid on

```



Calculo de RadioInterferencia por Efecto Corona para linea trifasica

%% Calculo de RadioInterferencia por Efecto Corona

clear all, close all, clc

% CASO TRIFÁSICO

mu0=4*pi*1e-7;%mu0

epsilon=8.8541878e-12; %permitividad del vacio

%Caracteristicas del Terreno

rhoT=923.864571; %Resistividad del Terreno Modificable

muT=mu0;

%Caracteristicas del Conductor

rhoC=0.0028834; %Resistividad del Conductor

muC=mu0;

%Caracteristicas de la Linea.

%Frecuencia

f=60;

nc=1; %numero de conductores por haz

R=0.2;%radio medio geometrico

w=2*pi*f;

mu=mu0;

%Alturas de los Conductores en metros

h1=25; %Modificable

h2=28.5; %Modificable

h3=30; %Modificable

h=[h1,h2,h3];

%Distancias medias geometricas:

x1=7; %Modificable

x2=30; %Modificable

x3=45; %Modificable

x=[x1,x2,x3];

%Radios de los conductores

r1=10.079e-3;

r2=10.079e-3;

r3=10.079e-3;

r=[r1,r2,r3];

%Cálculo de la Impedancia geometrica propia:

Zgii=(1j)*w*mu0*log(2*h./r)/2/pi;

Zgii=blkdiag(Zgii(1),Zgii(2),Zgii(3));

%Cálculo de Dik

Dik=zeros(3,3);

for i=1:3

for k=1:3

Dik(i,k)=sqrt((x(i)-x(k))^2+(h(i)+h(k))^2);

end

end

%Cálculo de dik

dik=zeros(3,3);

```

for i=1:3
    for k=1:3
        temp=sqrt((x(i)-x(k))^2+(h(i)-h(k))^2);
        if temp==0
            dik(i,k)=1;
        else
            dik(i,k)=temp;
        end
        clear temp
    end
end

%Cálculo de impedancia geometrica mutua
Zgik=(1j)*w*mu0*log(Dik./dik)/2/pi;
for i=1:3
    Zgik(i,i)=0;
end

%Calculo de Impedancia Geometrica Total
Zg=Zgii+Zgik;

% Calculo de profundidad de Penetración:
P=sqrt(rhoT/((1j)*w*muT));

%Impedancia debida al retorno por tierra propia
Ztii=(1j)*w*mu0*log(1+P./h)/2/pi;
Ztii=blkdiag(Ztii(1),Ztii(2),Ztii(3));

%Calculo de Dpik
Dpik=zeros(3,3);
for i=1:3
    for k=1:3
        Dpik(i,k)=sqrt((x(i)-x(k))^2+(h(i)+h(k)+2*P)^2);
    end
end

%Impedancia debida al retorno por tierra mutua
Ztik=(1j)*w*log(Dpik./Dik)/2/pi;
for i=1:3
    Ztik(i,i)=0;
end

%Impedancia debida al retorno por tierra total
Zt=Ztii+Ztik;

%Delta para Zinterna
delta=sqrt(rhoC/((1j)*w*muC));

%Impedancia interna del conductor
Rcd=rhoC./(pi*r.^2); %resistencia en CD
Zhf=rhoC./(2*pi*r*delta); %impedancias a muy altas
frecuencias.

```

```

Zc=sqrt(Rcd.^2+Zhf.^2);
Zc=blkdiag(Zc(1),Zc(2),Zc(3));
%Zc=[Zc(1)*ones(1,3); Zc(2)*ones(1,3); Zc(2)*ones(1,3)];

%Matriz de Impedancias
Z=Zg+Zt+Zc;

%Matriz de Coeficientes de Potencial
Pot=zeros(3,3);
for i=1:3
    for k=1:3
        if i==k
            Pot(i,k)=log(2*h(i)/r(i))/(2*pi*epsilon);
        else
            Pot(i,k)=log(Dik(i,k)/dik(i,k))/(2*pi*epsilon);
        end
    end
end
end

%Matriz C
C=inv(Pot);
%Matriz de derivación
Y=(1j)*w*C;

%Desacoplo
[M,lambaV]=eig(Z*Y);
[N,lambaI]=eig(Y*Z);
lamba=lambaV;
psi=sqrt(lamba);
alpha=real(psi);

%Vector de Excitación:
Vp=138; %Voltaje por fase en kV
V=Vp*[1; 0.5+j*0.5*sqrt(3);0.5-j*0.5*sqrt(3)]; %Vector de
Voltaje de fase
q=C*V;
gavg=q./(2*pi*epsilon*r')/100/nc;
gm=gavg.*(1+(nc-1)*r'/R);
Gama=-40.69+3.5*gm+6*2*r'*100;
J=C*Gama/(2*pi*epsilon);

%En dominio Modal
Jm=inv(N)*J;

Im=Jm./(2*sqrt(diag(alpha)));

I=N*blkdiag(Im(1),Im(2),Im(3));

%Campo Hx,k
num=1000;%numero de puntos
posicion=linspace(0,200,num);

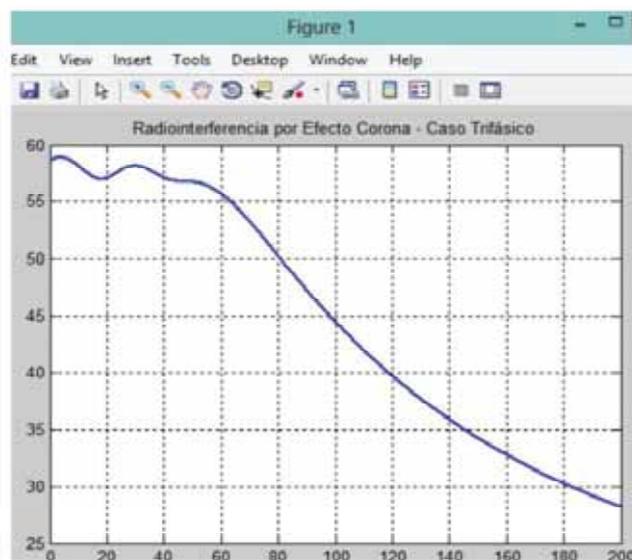
Aux=zeros(num,3);

```

```

for i=1:num
    Aux(i,:)=h./(h.^2+(x-posicion(i)).^2)+ ...
            (h+2*P)./((h+2*P).^2+(x-posicion(i)).^2);
end
H=Aux*I;
E=120*pi*H;
Erms=abs(E);
Erms=Erms(:,1).^2+Erms(:,2).^2+Erms(:,3).^2;
Erms=sqrt(Erms);
EdB=20*log(Erms)/log(10);
ECISPR=EdB+1.5;
% Grafica
plot(posicion,ECISPR,'LineWidth',2);
title('Radiointerferencia por Efecto Corona - Caso
Trifásico')
ylabel('E_CISPR dB')
xlabel('Distancia Horizontal')
grid on

```



Simulación para el caso de un subconductor

```

function pdemodel
[pde_fig,ax]=pdeinit;
pdetool('appl_cb',5);
pdetool('snaapon','on');
set(ax,'DataAspectRatio',[1 1.5 1]);
set(ax,'PlotBoxAspectRatio',[105 70 1]);
set(ax,'XLim',[-10 200]);
set(ax,'YLim',[-10 200]);
set(ax,'XTick',[ 0,...
    10,...
    20,...

```

```

30,...
40,...
50,...
60,...
70,...
80,...
90,...
100,...
110,...
120,...
130,...
140,...
150,...
160,...
170,...
180,...
190,...
200,...
]);
set(ax,'YTick',[ 0,...
10,...
20,...
30,...
40,...
50,...
60,...
70,...
80,...
90,...
100,...
110,...
120,...
130,...
140,...
150,...
160,...
170,...
180,...
190,...
200,...
]);
pdetool('gridon','on');

% Geometry description:
pdirect([0 190 190 0],'SQL');
pdcirc(90,30,5,'C1');
set(findobj(get(pde_fig,'Children'),'Tag','PDEEval'),'String',
'SQL-C1')

% Boundary conditions:
pdetool('changemode',0)

```

```

pdesetbd(8,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(7,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(6,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(5,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(4,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(3,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(2,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(1,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')

% Mesh generation:
setappdata(pde_fig,'Hgrad',1.3);
setappdata(pde_fig,'refinemethod','regular');
setappdata(pde_fig,'jiggle',char('on','mean',''));
setappdata(pde_fig,'MesherVersion','preR2013a');
pdetool('initmesh')
pdetool('refine')

% PDE coefficients:
pdeseteq(1,...

```

```

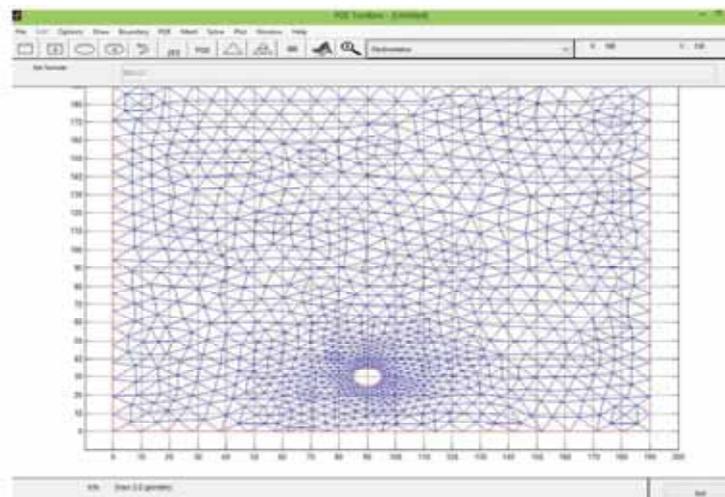
'8.85429*10^(-12)',...
'0.0',...
'0',...
'1.0',...
'0:10',...
'0.0',...
'0.0',...
'[0 100]')
setappdata(pde_fig,'currparam',...
[' 8.85429*10^(-12)';...
'0          '])

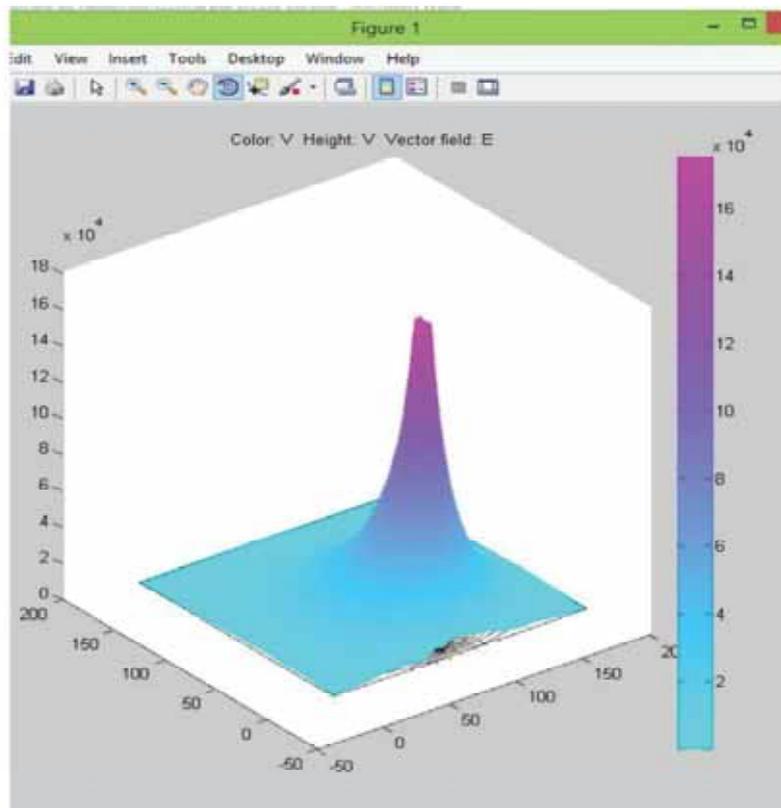
% Solve parameters:
setappdata(pde_fig,'solveparam',...
char('0','3132','10','pdeadworst',...
'0.5','longest','0','1E-4','','fixed','Inf'))

% Plotflags and user data strings:
setappdata(pde_fig,'plotflags',[1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1
1 1 0 1]);
setappdata(pde_fig,'colstring','');
setappdata(pde_fig,'arrowstring','');
setappdata(pde_fig,'deformstring','');
setappdata(pde_fig,'heightstring','');

% Solve PDE:
pdetool('solve')

```





Simulación para el caso de dos subconductores

```

function pdemodel
[pde_fig,ax]=pdeinit;
pdetool('appl_cb',5);
pdetool('snaon','on');
set(ax,'DataAspectRatio',[1 1.5 1]);
set(ax,'PlotBoxAspectRatio',[105 70 1]);
set(ax,'XLim',[-10 200]);
set(ax,'YLim',[-10 200]);
set(ax,'XTick',[ 0,...
10,...
20,...
30,...
40,...
50,...
60,...
70,...
80,...
90,...
100,...
110,...
120,...
130,...

```

```

140,...
150,...
160,...
170,...
180,...
190,...
200,...
]);
set(ax,'YTick',[ 0,...
10,...
20,...
30,...
40,...
50,...
60,...
70,...
80,...
90,...
100,...
110,...
120,...
130,...
140,...
150,...
160,...
170,...
180,...
190,...
200,...
]);
pdetool('gridon','on');

% Geometry description:
pdirect([0 190 190 0],'SQ1');
pdecirc(90,30,5,'C1');
pdecirc(110,30,5,'C2');
set(findobj(get(pde_fig,'Children'),'Tag','PDEEval'),'String','SQ1-C1-C2')

% Boundary conditions:
pdetool('changemode',0)
pdesetbd(12,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(11,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')

```

```
pdesetbd(10,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(9,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(8,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(7,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(6,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(5,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(4,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(3,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(2,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(1,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
```

```

% Mesh generation:
setappdata(pde_fig,'Hgrad',1.3);
setappdata(pde_fig,'refinemethod','regular');
setappdata(pde_fig,'jiggle',char('on','mean',''));
setappdata(pde_fig,'MesherVersion','preR2013a');
pdetool('initmesh')
pdetool('refine')

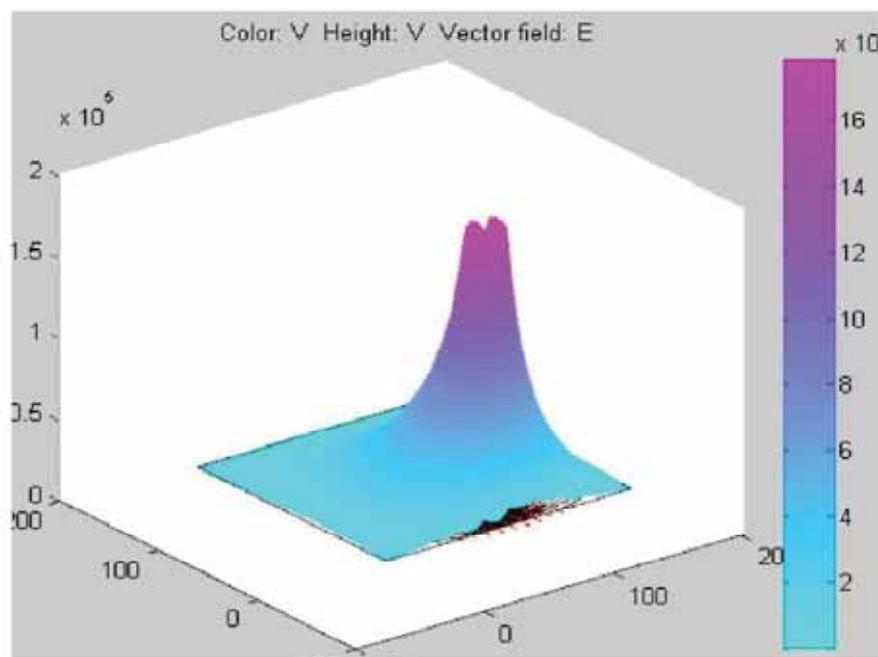
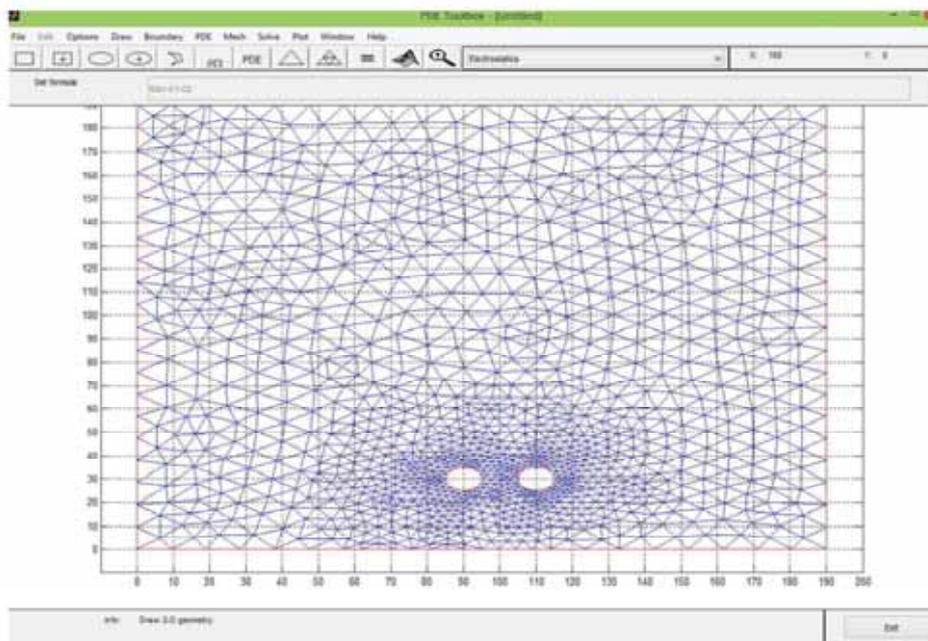
% PDE coefficients:
pdeseteq(1,...
'8.85429*10^(-12)',...
'0.0',...
'0',...
'1.0',...
'0:10',...
'0.0',...
'0.0',...
'[0 100]')
setappdata(pde_fig,'currparam',...
[' 8.85429*10^(-12)';...
'0          '])

% Solve parameters:
setappdata(pde_fig,'solveparam',...
char('0','3582','10','pdeadworst',...
'0.5','longest','0','1E-4','','fixed','Inf'))

% Plotflags and user data strings:
setappdata(pde_fig,'plotflags',[1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1
1 1 0 1]);
setappdata(pde_fig,'colstring','');
setappdata(pde_fig,'arrowstring','');
setappdata(pde_fig,'deformstring','');
setappdata(pde_fig,'heightstring','');

% Solve PDE:
pdetool('solve')

```



Simulación para el caso de cuatro subconductores

```
function pdemodel
[pde_fig,ax]=pdeinit;
pdetool('appl_cb',5);
pdetool('snaon','on');
```

```
set(ax, 'DataAspectRatio', [1 1.5 1]);
set(ax, 'PlotBoxAspectRatio', [105 70 1]);
set(ax, 'XLim', [-10 200]);
set(ax, 'YLim', [-10 200]);
set(ax, 'XTick', [ 0, ...
    10, ...
    20, ...
    30, ...
    40, ...
    50, ...
    60, ...
    70, ...
    80, ...
    90, ...
    100, ...
    110, ...
    120, ...
    130, ...
    140, ...
    150, ...
    160, ...
    170, ...
    180, ...
    190, ...
    200, ...
]);
set(ax, 'YTick', [ 0, ...
    10, ...
    20, ...
    30, ...
    40, ...
    50, ...
    60, ...
    70, ...
    80, ...
    90, ...
    100, ...
    110, ...
    120, ...
    130, ...
    140, ...
    150, ...
    160, ...
    170, ...
    180, ...
    190, ...
    200, ...
]);
pdetool('gridon', 'on');

% Geometry description:
```

```

pderect([0 190 190 0], 'SQ1');
pdecirc(90,30,5, 'C1');
pdecirc(110,30,5, 'C2');
pdecirc(90,50,5, 'C3');
pdecirc(110,50,5, 'C4');
set(findobj(get(pde_fig, 'Children'), 'Tag', 'PDEEval'), 'String', 'SQ1-C1-C2-C3-C4')

% Boundary conditions:
pdetool('changemode',0)
pdesetbd(20,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(19,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(18,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(17,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(16,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(15,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(14,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(13,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(12,...

```

```
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(11,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(10,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(9,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(8,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(7,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(6,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(5,...
'dir',...
1,...
'1',...
'180e3')
pdesetbd(4,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(3,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(2,...
'dir',...
```

```

1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(1,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')

% Mesh generation:
setappdata(pde_fig, 'Hgrad', 1.3);
setappdata(pde_fig, 'refinemethod', 'regular');
setappdata(pde_fig, 'jiggle', char('on', 'mean', ''));
setappdata(pde_fig, 'MesherVersion', 'preR2013a');
pdetool('initmesh')
pdetool('refine')

% PDE coefficients:
pdeseteq(1,...
'8.85429*10^(-12)',...
'0.0',...
'0',...
'1.0',...
'0:10',...
'0.0',...
'0.0',...
'[0 100]')
setappdata(pde_fig, 'currparam',...
[' 8.85429*10^(-12)';...
'0          '])

% Solve parameters:
setappdata(pde_fig, 'solveparam',...
char('0', '4446', '10', 'pdeadworst',...
'0.5', 'longest', '0', '1E-4', '', 'fixed', 'Inf'))

% Plotflags and user data strings:
setappdata(pde_fig, 'plotflags', [1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1
1 1 0 1]);
setappdata(pde_fig, 'colstring', '');
setappdata(pde_fig, 'arrowstring', '');
setappdata(pde_fig, 'deformstring', '');
setappdata(pde_fig, 'heightstring', '');

% Solve PDE:
pdetool('solve')

```

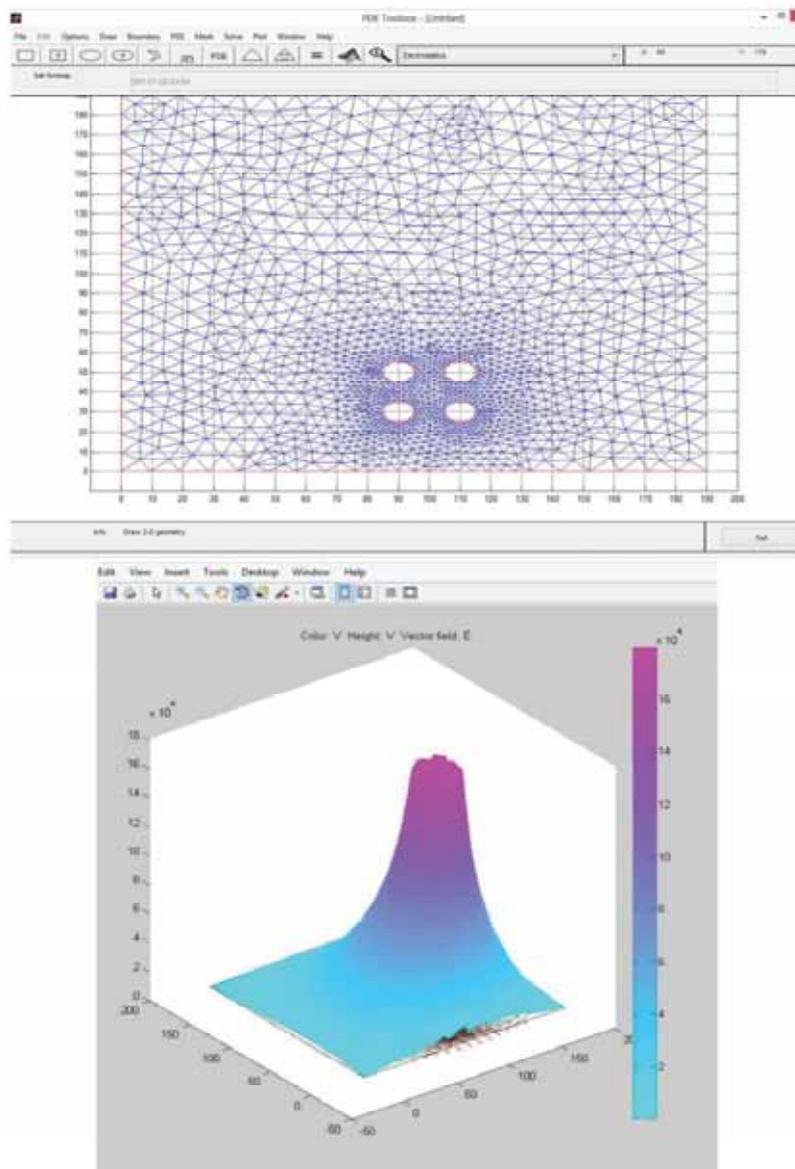
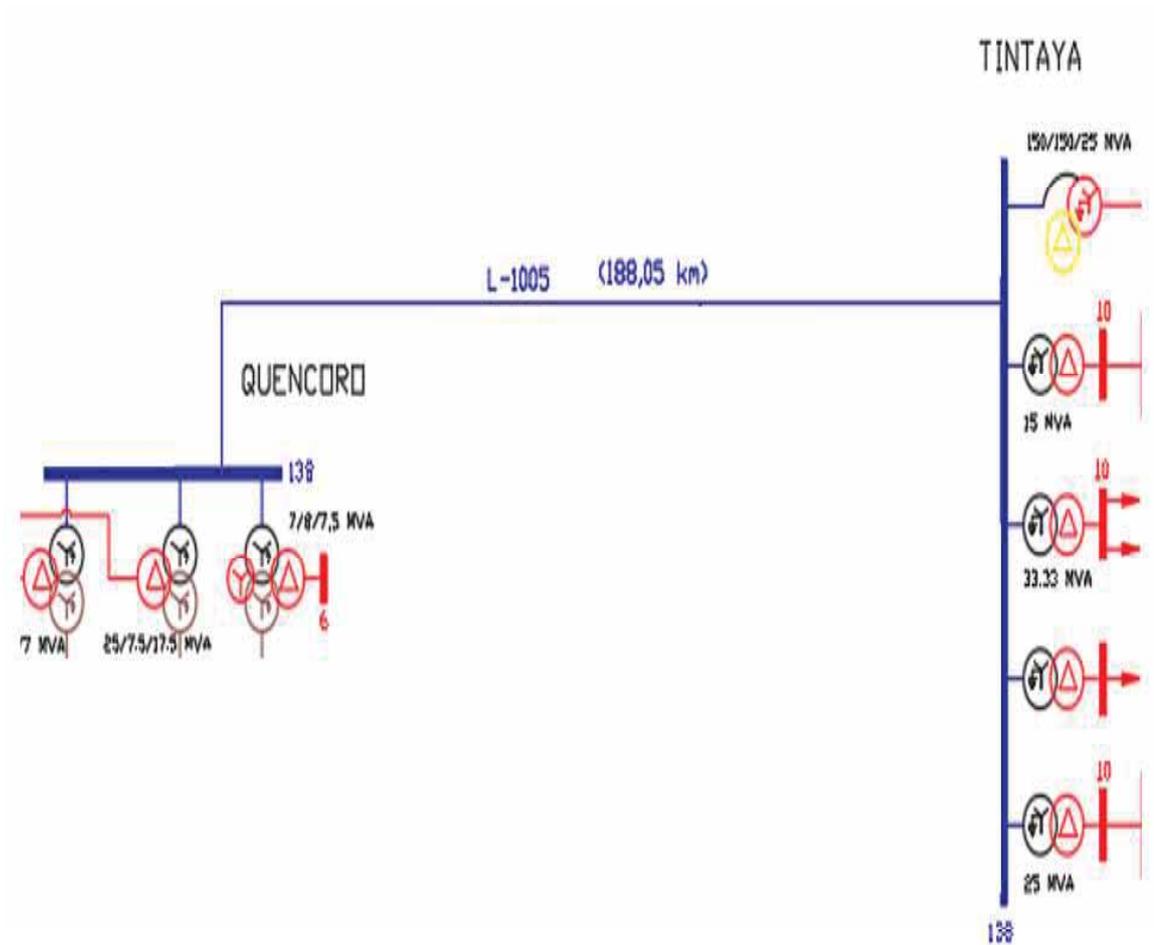


DIAGRAMA UNIFILAR DEL TRAMO QUENCCORO-TINTAYA



PANEL FOTOGRAFICO

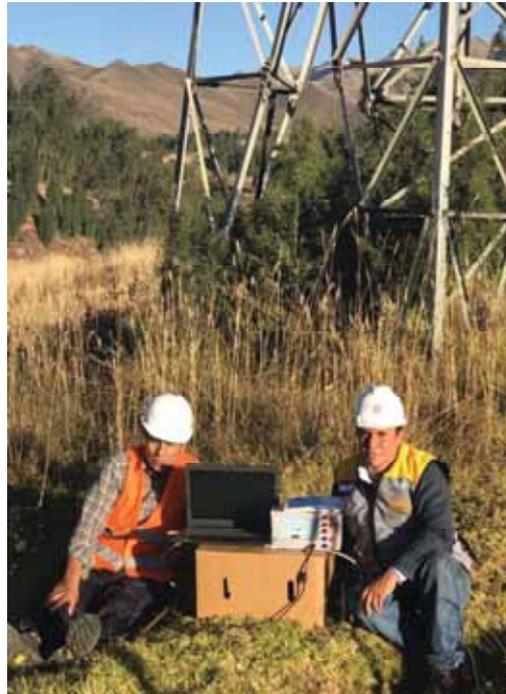


Foto 1:Medición de la RI con instrumento RIV Meter



Foto 2:Foto de la medición de la RI

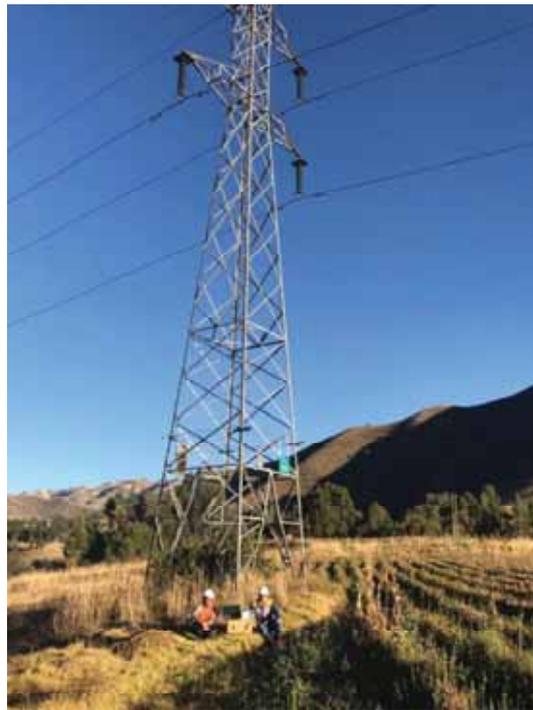


Foto 3:Foto panorámico de la zona



Foto 4:Foto que muestra la línea de transmisión 1050



Foto 5:Foto de las torres de transmisión y las antenas de comunicación