



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL CAMPO ELÉCTRICO EN CADENAS DE
AISLADORES CON ELEMENTOS FINITOS**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERIA ELÉCTRICA – SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

P R E S E N T A:

GUILLERMO AGUIRRE LÓPEZ

TUTOR:

DR. RAFAEL ESCARELA PÉREZ



2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Gerardo René Espinosa Pérez

Secretario: Dr. César Ángeles Camacho

Vocal: Dr. Rafael Escarela Pérez

1^{er} Suplente: Dr. Paul Rolando Maya Ortiz

2^o Suplente: M.I. Rodolfo Lorenzo Bautista

Lugar donde se realizó la tesis:

Ciudad Universitaria, México D.F.

TUTOR DE TESIS:

DR. RAFAEL ESCARELA PÉREZ

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por todas las oportunidades y apoyo que he recibido por parte de ella.

Al Dr. Rafael Escarela Pérez por su paciencia, guía y enseñanzas.

A los profesores del Campo Disciplinario de Sistemas Eléctricos de Potencia de la Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería y del Instituto de Ingeniería, que forman parte del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de la UNAM, por su contribución en mi formación profesional y personal.

A los ingenieros del área de líneas de transmisión del Grupo de Apoyo del Instituto de Investigaciones Eléctricas para la Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación de la Comisión Federal de Electricidad, por su contribución en mi formación profesional y personal.

DEDICATORIA

A mi familia.

*You can't always get what you want
But if you try sometimes you might find
You get what you need*

Rolling Stones

RESUMEN

En este trabajo se realiza el análisis del campo eléctrico en cadenas de aisladores estándar de vidrio templado utilizadas en líneas eléctricas de transmisión de Sistemas Eléctricos de Potencia aplicando el Método de los Elementos Finitos. El análisis se realiza para evaluar el comportamiento del campo eléctrico en las cadenas de aisladores bajo los efectos de desplazamientos transversales de las mismas, respecto a las estructuras de transmisión, y que son producidos por la presencia de viento. Se consideran las configuraciones geométricas de estructuras de transmisión empleadas en México.

Como parte del trabajo se consideraron los tópicos de teoría electromagnética involucrados, así como los procedimientos y normas que definen el comportamiento del desplazamiento de cadenas de aisladores ante la presencia de cargas mecánicas por viento en líneas de transmisión.

Se desarrollan modelos numéricos tridimensionales para configuraciones de estructuras y cadenas de aisladores para los niveles de voltaje de 115, 230 y 400 kV, empleados por la Comisión Federal de Electricidad en las líneas de transmisión mexicanas, y ante diversos ángulos de balanceo de las cadenas de aisladores. De esta manera se obtuvieron resultados del comportamiento del campo eléctrico y la distribución del potencial eléctrico escalar a lo largo de las cadenas, presentando los esfuerzos eléctricos mayores para cada caso de estudio desarrollado.

ABSTRACT

This work is about the electric field analysis on standard toughed glass insulator strings used in electric transmission lines of electrical power systems applying the Finite Elements Method. Analysis is done in order to evaluate the electric field behavior in insulator string under the effects of transversal displacements, related to transmission structures, and which are produced by wind presence. Geometrical configurations of transmission structures used in Mexico are considered.

Such as part of the work are considered electromagnetic theory topics involved, also procedures and standards that define the behavior of insulators string displacement in presence of wind mechanical loads on transmission lines.

Tridimensional numerical models are developed for structure configurations and insulator strings of 115, 230, and 400 kV voltage levels, used by Comisión Federal de Electricidad in Mexican transmission lines, and with different swing angles. This way, results of electric field and potential distribution along strings were obtained, showing maximum electrical efforts in each study case developed.

CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
CONTENIDO	iii
FIGURAS	v
TABLAS	viii
NOMENCLATURA	ix
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	3
1.2.1 Aportaciones realizadas al análisis del campo eléctrico y distribución de potencial en cadenas de aisladores con métodos numéricos	4
1.3 Objetivo de la tesis	7
1.4 Alcance de la tesis	7
1.5 Estructura de la tesis	8
2 EL CAMPO ELÉCTRICO EN CADENAS DE AISLADORES	9
2.1 Introducción	9
2.2 Estructura y diseño de cadenas de aisladores en líneas de transmisión	10
2.3 Campo eléctrico y distribución de potencial en cadenas de aisladores	12
2.3.1 Métodos experimentales para el análisis de campo eléctrico y distribución de potencial en aisladores	14
2.3.2 Métodos numéricos para el análisis de campo eléctrico y distribución de potencial en aisladores	15
2.4 Fundamentos de teoría electromagnética	18
2.5 El método de los elementos finitos	20
2.6 Programas de cómputo aplicados al análisis de campo eléctrico por métodos numéricos	21
3 ÁNGULO DE BALANCEO EN CADENAS DE AISLADORES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	23
3.1 Introducción	23
3.2 Normas y especificaciones	23
3.2.1 NOM-001-SEDE-2005	24
3.2.2 CIGRE 348 y 72	25
3.2.2.1 Libramientos	33
3.2.3 Comisión Federal de Electricidad	35
4 CASOS DE ESTUDIO EN EL ANÁLISIS DEL CAMPO ELÉCTRICO EN CADENAS DE AISLADORES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	36
4.1 Introducción	36

4.2	Casos de estudio	37
4.2.1	Características	38
4.3	Descripción geométrica de las líneas de transmisión de 115 kV	39
4.3.1	Campo eléctrico y distribución de potencial en cadena de aisladores en disposición vertical para 115 kV	41
4.3.2	Campo eléctrico y distribución de potencial en cadena de aisladores con ángulo de balanceo para 115 kV	49
4.4	Descripción geométrica de las líneas de transmisión de 230 kV	54
4.4.1	Campo eléctrico y distribución de potencial en cadena de aisladores en disposición vertical para 230 kV	56
4.4.2	Campo eléctrico y distribución de potencial en cadena de aisladores con ángulo de balanceo para 230 kV	64
4.5	Descripción geométrica de las líneas de transmisión de 400 kV	69
4.5.1	Campo eléctrico y distribución de potencial en cadena de aisladores en disposición vertical para 400 kV	70
4.6	Modelo geométrico de cadena de aisladores con cambios en longitud del cable conductor	74
4.7	Modelo geométrico de cadena de aisladores con cambios en dimensión de fronteras	76
4.8	Resultados y análisis	79
5	CONCLUSIONES	81
5.1	Conclusiones	81
5.2	Trabajos futuros	82
	BIBLIOGRAFÍA	84
	APENDICE A	90

FIGURAS

Figura 2.1.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV.	9
Figura 2.2.	Partes de un aislador [NGK, 2007].	10
Figura 2.3.	Dimensiones generales de aislador 25SVC111 [CFE, 2004a].	11
Figura 2.4.	Circuito equivalente de cadena de aisladores [Still, 1927].	12
Figura 2.5.	Distribución del voltaje entre las unidades de una cadena de aisladores [Still, 1927].	13
Figura 2.6.	Malla generada de elementos finitos de una cadena de aisladores.	17
Figura 2.7.	Elemento triangular.	20
Figura 3.1.	Valores calculados y medidos del ángulo de balanceo respecto a la velocidad del viento [CIGRE 348,2008].	27
Figura 3.2.	Cargas mecánicas por viento y peso en cadena de aisladores para determinación de ángulo de balanceo.	28
Figura 3.3.	Registro de ángulos de balanceo [°] respecto a velocidad del viento [m/s] para 4 conductores ACSR 240/40 sin hielo [CIGRE 348, 2008].	30
Figura 3.4.	Ángulos de balanceo medidos contra calculados en Canadá [CIGRE 348, 2008].	31
Figura 3.5.	Determinación del ángulo de balanceo en aisladores para valores de k_w basados en mediciones [EPRI, 1987]. Para una velocidad del viento de 120 km/h y un parámetro de $k_w=20$ el ángulo de balanceo del aislador es 20° [CIGRE 348, 2008].	32
Figura 4.1.	Sección transversal de aislador definida dentro de los casos de estudio.	39
Figura 4.2.	Dimensiones generales de estructuras de 115 kV de la CFE.	40
Figura 4.3.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV con disposición vertical en poste 1210SMP.	41
Figura 4.4.	Distribución de potencial a lo largo de cadena de aisladores de 115 kV en disposición vertical para poste 1210SMP (distancia brazo medio a brazo inferior de la estructura).	43
Figura 4.5.	Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV con disposición vertical en poste 1210SMP.	43
Figura 4.6.	Campo eléctrico a lo largo de cadena de aisladores de 115 kV en disposición vertical para poste 1210SMP (distancia brazo medio a brazo inferior de la estructura).	45
Figura 4.7.	Campo eléctrico en el primer aislador de la cadena de 115 kV.	45
Figura 4.8.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV con disposición vertical en torre E71A21.	46
Figura 4.9.	Distribución de potencial a lo largo de cadena de aisladores de 115 kV en disposición vertical para torre E71A21 (distancia cruceta media a cruceta inferior de la estructura).	47
Figura 4.10.	Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV con disposición vertical para torre E71A21.	48
Figura 4.11.	Campo eléctrico a lo largo de cadena de aisladores de 115 kV en disposición vertical para torre E71A21 (distancia cruceta media a cruceta inferior de la estructura).	49
Figura 4.12.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para poste 1210SMP.	50

Figura 4.13.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para poste 1210SMP.	50
Figura 4.14.	Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para poste 1210SMP.	51
Figura 4.15.	Campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para poste 1210SMP.	52
Figura 4.16.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para torre E71A21.	52
Figura 4.17.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para torre E71A21.	53
Figura 4.18.	Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para torre E71A21.	53
Figura 4.19.	Campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para torre E71A21.	54
Figura 4.20.	Dimensiones generales de estructuras de 230 kV de la CFE.	55
Figura 4.21.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con disposición vertical en poste AS2.	56
Figura 4.22.	Distribución de potencial a lo largo de cadena de aisladores de 230 kV en disposición vertical para poste AS2 (distancia brazo medio a brazo inferior de la estructura).	58
Figura 4.23.	Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 230 kV con disposición vertical en poste AS2.	59
Figura 4.24.	Campo eléctrico a lo largo de cadena de aisladores de 230 kV en disposición vertical para poste AS2 (distancia brazo medio a brazo inferior de la estructura).	60
Figura 4.25.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con disposición vertical en torre 2B2.	60
Figura 4.26.	Distribución de potencial a lo largo de cadena de aisladores de 230 kV en disposición vertical para torre 2B2 (distancia cruceta media a cruceta inferior de la estructura).	62
Figura 4.27.	Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 230 kV con disposición vertical para torre 2B2.	62
Figura 4.28.	Campo eléctrico a lo largo de cadena de aisladores de 230 kV en disposición vertical para torre 2B2 (distancia cruceta media a cruceta inferior de la estructura).	64
Figura 4.29.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para poste AS2.	65
Figura 4.30.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para poste AS2.	65
Figura 4.31.	Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para poste AS2.	66
Figura 4.32.	Campo eléctrico en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para poste AS2.	66
Figura 4.33.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para torre 2B2.	67
Figura 4.34.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de	67

	balanceo para torre 2B2.	
Figura 4.35.	Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para torre 2B2.	68
Figura 4.36.	Campo eléctrico en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para torre 2B2.	68
Figura 4.37.	Dimensiones generales de estructura de 400 kV de la CFE.	70
Figura 4.38.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 400 kV en configuración “V” para torre EA4A22MA.	71
Figura 4.39.	Distribución de potencial en cadena de aisladores de 400 kV en configuración “V” para torre EA4A22MA.	72
Figura 4.40.	Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 400 kV en configuración “V” para torre EA4A22MA.	72
Figura 4.41.	Campo eléctrico en cadena de aisladores de 400 kV en configuración “V” para torre EA4A22MA.	74
Figura 4.42.	Comparativa de la distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV para poste 1210SMP con longitudes de conductor diferentes.	75
Figura 4.43.	Comparativa del campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV para poste 1210SMP con longitudes de conductor diferentes.	75
Figura 4.44.	Modelo geométrico establecido de sección de poste 1210SMP de 115 kV con fronteras externas de 20 metros (distribución de potencial).	77
Figura 4.45.	Campo eléctrico en modelo establecido de cadena de aisladores de 115 kV con cambios en dimensiones de fronteras externas.	77

TABLAS

Tabla 2.1.	Características electromecánicas y dimensionales de aisladores [CFE, 2004a].	11
Tabla 3.1.	Coordinación de posición de conductores y cadena de aisladores respecto a esfuerzos eléctricos [CIGRE 348, 2008].	32
Tabla 3.2.	Coordinación de impulsos de voltaje y libramientos [CIGRE 348, 2008].	33
Tabla 3.3.	Libramientos para el nivel de voltaje a la frecuencia del sistema [CIGRE 348, 2008].	34
Tabla 4.1.	Propiedades dieléctricas de elementos utilizados dentro de los casos de estudio.	39
Tabla 4.2.	Campo eléctrico en cadenas de aisladores ante diferentes estructuras y ángulos de balanceo.	79
Tabla A.1.	Características de los casos de estudio realizados en cadenas de aisladores mediante el FEM.	90

NOMENCLATURA

SIMBOLO	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
V	[V]	Voltaje
n		Número total de aisladores en la cadena o conductores agrupados en haz
$k = C_g/C$		Relación de capacitancias
v	[m ³]	Volumen
S	[m ²]	Superficie
∇V		Gradiente de V
\bar{D}	[C/m ²]	Densidad de flujo eléctrico
ρ_v	[C/m ³]	Densidad volumétrica de carga
ψ	[C]	Flujo eléctrico
$\nabla \cdot \bar{X}$		Divergencia de \bar{X}
ε	[F/m]	Permitividad
\bar{E}	[V/m]	Campo eléctrico
σ	[S/m]	Conductividad
ϕ_{ins}, \emptyset	[°]	Ángulo de balanceo de aislador
ρ	[kg/m ³]	Densidad del aire
V_P	[m/s]	Velocidad del viento
C_{XC}		Coefficiente de arrastre de los conductores (1,0)
d	[m]	Diámetro del conductor
L_W	[m]	Claro de viento
F_{Wins}	[N]	Carga de viento en la cadena de aisladores
W_C	[N]	Peso del conductor
W_{ins}	[N]	Peso del conjunto de aislamiento
F_{WC}	[N]	Carga de viento en conductores
$q_Z = \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot V_Z^2$	[N/m ²]	Presión del viento correspondiente a la velocidad promedio del viento
G_C		Factor de ráfaga del conductor
G_L		Factor de claro
V_R	[m/s]	Velocidad de viento de referencia
Z_R	[m]	Altura de referencia de la velocidad del viento
α		Factor de ajuste acorde al tipo de terreno
$V_Z = V_R \left(\frac{Z}{Z_R}\right)^\alpha$	[m/s]	Velocidad del viento promedio a la altura Z
C_{Xins}		Coefficiente de arrastre del aislador (1,2)
A_{ins}	[m ²]	Área del conjunto de aislamiento expuesta la viento
m_C	[kg/m]	Masa lineal del conductor
g	[m/s ²]	Aceleración gravitacional (9,81)
L_C	[m]	Claro de peso del conductor
M_{ins}	[kg]	Masa del conjunto de aislamiento

k_w		Parámetro
K		Matriz de orden N por N
i, j, m		Números enteros positivos
U_R	[kV]	Voltaje nominal
U_S	[kV]	Voltaje máximo del sistema
U_{ff}	[kV]	Voltaje resistido por frente de onda rápido (descarga)
U_{max-sf}	[kV]	Voltaje resistido por frente de onda lento (maniobra)
D_{pe}	[m]	Distancia mínima fase a fase
D_{pp}	[m]	Distancia mínima fase a tierra

ABREVIACIONES

DESCRIPCIÓN

ANCE	Asociación Nacional de Normalización y Certificación del Sector Eléctrico
ANSI	American National Standards Institute
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
EN	European Standards
EPRI	Electric Power Research Institute
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma Oficial Mexicana

1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Las líneas de transmisión de energía eléctrica se encuentran conformadas por diversos elementos, donde las cadenas de aisladores son fundamentales, y cuya función principal es la de aislar y soportar a los conductores que transmiten la energía eléctrica. La importancia de conocer, estudiar y analizar todos los factores electromecánicos involucrados en la selección, comportamiento y diseño de las cadenas de aisladores influye directamente en los costos, la seguridad y el desempeño de las líneas de transmisión y por lo tanto en la continuidad del servicio de energía eléctrica.

La selección de cadenas de aisladores en líneas de transmisión forma parte de la coordinación de aislamiento de un Sistema Eléctrico de Potencia, definida en su forma más fundamental como: la selección de la resistencia del aislamiento [Hileman, 1999]. Para la correcta determinación de la longitud de una cadena de aisladores, se encuentran definidos procedimientos y estándares por parte de organismos internacionales (IEC, IEEE, CIGRE) y nacionales (NMX,CFE) referentes a la coordinación de aislamiento [IEC, 1993 & 1996; IEEE, 1996 & 1999; NMX, 1997 & 2004; CFE, 2009a].

En México las líneas de transmisión se encuentran clasificadas acorde a su nivel de tensión eléctrica con valores desde 115 kV hasta 400 kV [CFE, 1985], donde el aislamiento se realiza mediante cadenas de aisladores. Las especificaciones [CFE, 1991] y [CFE, 1995] establecen procedimientos y criterios para la determinación de la coordinación de aislamiento con la finalidad de seleccionar el tipo de aislador a emplear y número de unidades acorde a: a) nivel de voltaje; b) sobretensión temporal o transitorias; c) altura sobre nivel del mar; d) nivel de contaminación; e) distancia de paso del aislador y f) distancia de fuga del aislador. Los aisladores a emplear en las líneas de transmisión en México generalmente son los denominados 25SPC111C (porcelana) ó los 25SVC111C (vidrio templado) por la Comisión Federal de Electricidad [CFE, 2004a].

Las cadenas de aisladores operan bajo esfuerzos mecánicos, eléctricos y ambientales constantes que deben ser soportados para que la continuidad y seguridad del sistema de transmisión no se vea afectada. Dentro de los fenómenos físicos que se presentan en las cadenas de aisladores se pueden mencionar:

- Esfuerzos eléctricos y mecánicos continuos causados por el voltaje nominal de operación y peso de los elementos asociados a la cadena de aisladores (cable conductor, herrajes y accesorios).
- Esfuerzos transitorios ó periódicos de naturaleza eléctrica, mecánica y ambiental como por ejemplo: descargas atmosféricas, operación de interruptores, contaminación depositada en las cadenas, viento, cambios de temperatura, carga adicional por presencia de hielo, lluvia, etc.

Estos fenómenos afectan la operación de la cadena de aisladores de tal forma que conocer su comportamiento ante dichos eventos es importante. Los aisladores empleados para las líneas de transmisión se encuentran constituidos de partes conductoras y dieléctricas que presentan diferentes formas y materiales para lograr el mejor desempeño mecánico y eléctrico posible ante determinadas condiciones de operación. En relación al comportamiento eléctrico de los aisladores, éstos se pueden considerar como capacitores en serie cuando conforman una cadena de varias unidades, por los cuales circulan corrientes de fuga y capacitivas así como entre los elementos metálicos y la estructura, generando pérdidas de energía. Estas corrientes son generalmente pequeñas (del orden de miliamperios) en relación a la transmitida por las líneas de transmisión [Guile, 1977;Still, 1927].

Las corrientes que se presentan a lo largo de los aisladores no son uniformes debido a: la disposición de sus partes; el espaciamiento entre unidades; condiciones ambientales y la resistencia eléctrica de las superficies de los aisladores, de tal forma que la distribución capacitiva y consecuentemente las corrientes y voltajes son mayores en algunas partes de una cadena de aisladores, lo que puede contribuir a un daño en algún punto particular de un aislador. Por lo anterior, es importante que se distribuyan de manera uniforme (en la medida de lo posible) los esfuerzos eléctricos a lo largo de la cadena, con la finalidad de que alguna unidad no presente un sobreesfuerzo continuo y llegue a fallar con el paso del tiempo. Las cadenas de aisladores que operan con niveles de voltaje mayores a 230 kV son más susceptibles de presentar una

distribución no uniforme de voltaje importante, afectándose así a los aisladores, de tal forma que por medio de cambios en su forma, materiales y la adición de ciertos dispositivos como los anillos equipotenciales se establece una mejor distribución de los esfuerzos eléctricos en las cadenas de aisladores, previniendo un envejecimiento y falla prematura [Ilhan, 2007].

Con la finalidad de lograr un diseño tanto técnica como económicamente adecuado de los aislamientos es necesario contar con información asociada a su comportamiento eléctrico. Consecuentemente, las mediciones y los cálculos de los esfuerzos eléctricos en las cadenas de aisladores representan las bases de un correcto diseño, siendo el campo eléctrico y la distribución del potencial eléctrico escalar dos de los parámetros más importantes a ser considerados.

1.2. Antecedentes

En relación al estudio y análisis del diseño y comportamiento del campo eléctrico y la distribución de potencial en cadenas de aisladores, se han desarrollado trabajos por parte de fabricantes, grupos de investigadores, laboratorios y empresas suministradoras de energía eléctrica desde hace más de un siglo, dentro de los cuales, los modelos físicos, ya sea reales ó a escala, y las pruebas en campo ó laboratorio establecen información relevante que se tiene del tema hasta la actualidad [Edison Electric Institute, 1968].

Los fenómenos analizados en ingeniería muchas veces involucran una representación mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, las cuales se solucionan (ó mejor dicho se aproxima su solución) mediante técnicas numéricas para ciertas condiciones iniciales y de frontera, de tal forma que se puede predecir su comportamiento. Consecuentemente, los métodos numéricos son empleados en diversas áreas de la ciencia e ingeniería: estructural, térmica, electromagnética y mecánica de fluidos entre muchas otras [Bondeson, 2005; Zienkiewicz, 2005].

Debido al avance continuo en los sistemas computacionales, se pueden realizar actualmente estudios extremadamente complejos para fenómenos electromagnéticos mediante diversas técnicas experimentales y numéricas [Que, 2002; Bondeson, 2005; IEEE Taskforce on Electrical Fields and Composite Insulators, 2008]. El estudio y análisis del comportamiento eléctrico en cadenas de aisladores de vidrio templado, porcelana y de otros tipos (como las

sintéticas) mediante la aplicación de métodos numéricos permite el diseño del aislador, así como estudiar el dimensionamiento de las estructuras de transmisión (torres y postes) y la configuración de las líneas de transmisión, influyendo directamente en la optimización de costos y mejoras en el desempeño de los sistemas de transmisión [Zhao, 2000].

1.2.1. Aportaciones realizadas al análisis del campo eléctrico y distribución de potencial en cadenas de aisladores con métodos numéricos

Las aportaciones y trabajos que se han efectuado para el análisis del campo eléctrico en los aislamientos de líneas de transmisión, ya sean de vidrio templado, porcelana ó sintéticas aplicando métodos numéricos se describen a continuación.

Rasolonjanahary analiza el comportamiento tridimensional de aisladores contaminados mediante el método numérico de elementos de frontera (BEM, por sus siglas en inglés), estableciendo una formulación teórica y comparando los resultados con valores obtenidos de forma analítica y experimental [Rasolonjanahary, 1992].

Asenjo, Morales y Valdenegro definen un método de cálculo para determinar el campo eléctrico de baja frecuencia en aisladores estándar contaminados, considerando modelos axisimétricos y aplicando el método numérico de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés)[Asenjo, 1997].

T. Zhao y M. Comber evalúan el comportamiento de la distribución de potencial y campo eléctrico en aisladores no cerámicos, considerando los conductores y estructura de la línea de transmisión mediante el BEM [Zhao, 2000]. Dentro de los resultados obtenidos se encuentran: a) recomendaciones para la simplificación de los modelos numéricos con la finalidad de obtener valores precisos de campo eléctrico y distribución de potencial sin afectar el resultado, b) la conclusión de que el modelado explícito de los faldones del aislador no cerámico causa errores máximos del campo eléctrico del 3%, c) la longitud del conductor representa un efecto significativo en la distribución del potencial y el campo eléctrico, d) conforme el aislador se encuentra más cerca de la estructura aterrizada (ventana) el campo eléctrico es mayor, d) el valor máximo del campo eléctrico se ve reducido en el aislador conforme la posición del anillo

equipotencial se aproxima a su parte aterrizada y e) el diámetro del tubo del anillo equipotencial presenta poca influencia en el campo eléctrico a lo largo del aislador, pero es importante para el control del efecto corona.

Que y Sebo analizan el campo eléctrico en aisladores no cerámicos para condiciones de contaminación y presencia de gotas de agua [Que, 2002]. Con el desarrollo de modelos simplificados, determinaron que la simulación del campo eléctrico, con pocos faldones en la parte cercana a la fuente de voltaje, arroja resultados muy similares a los de modelos completos del aislador (con todos los faldones).

Schumann analiza el campo eléctrico en aisladores compuestos considerando anillos equipotenciales así como el efecto de sus parámetros (diámetro del tubo y radio) en el campo eléctrico [Schumann, 2002]. Dentro de los resultados se presenta el diseño de anillo equipotencial considerado como óptimo, en relación a su comportamiento de campo eléctrico con siete diferentes modelos.

El grupo de trabajo conformado por Kontargyri en Grecia ha realizado en esta década diversos estudios en cadenas de aisladores de porcelana, vidrio templado y sintéticas bajo condiciones operativas limpias y de contaminación [Kontargyri, 2004a & 2004b&2006a&2006b&2007 &2008]. El grupo ha evaluado las comparaciones entre resultados experimentales, modelos axisimétricos y tridimensionales con el método numérico de los elementos finitos, en relación a las distribuciones de voltaje y comportamiento del campo eléctrico. También se realizó la comparación entre modelos completos y simplificados de aisladores compuestos.

Marungsri y Onchantuek analizan el comportamiento del campo eléctrico y la distribución de potencial en la superficie de aisladores poliméricos con diferentes configuraciones de faldones, bajo condiciones de contaminación por sal, en forma experimental y vía simulación numérica mediante elementos finitos, observándose un mejor desempeño del campo eléctrico en aisladores con faldones alternados de diferentes diámetros respecto a los de igual diámetro y forma a lo largo de todo el aislador [Marungsri, 2008; Onchantuek, 2009]. También se evalúa el comportamiento eléctrico ante la presencia de agua en el aislador, observándose cambios en el campo eléctrico a diferencia de la distribución del potencial que mantiene casi el mismo comportamiento con ó sin presencia de gotas de agua a lo largo del aislador.

Izgi define un modelo simplificado capacitivo-resistivo equivalente de las cadenas de aisladores en el que evalúa distribución de potencial y la eficiencia de la cadena bajo condiciones de viento y contaminación, observando una mejora en la distribución de potencial conforme la acción del viento aleja la cadena de aisladores del cuerpo de la estructura y viceversa conforme se acerca la cadena a la estructura [Izgi, 2008].

El grupo de trabajo en campos eléctricos y aisladores compuestos del IEEE evalúa el comportamiento del campo eléctrico en aisladores compuestos observando una mayor magnitud del campo eléctrico en las partes energizadas y aterrizadas que a lo largo de los faldones intermedios del aislador [IEEE Taskforce on Electrical Fields and Composite Insulators, 2008]. Se encuentra que la mayor magnitud del campo eléctrico está asociada a la posición y dimensiones del anillo equipotencial. La presencia de agua en los aisladores compuestos ocasiona más probabilidad de efecto corona y un incremento de corrientes de fuga de tal forma que se daña el aislamiento. Para aisladores compuestos se plantean valores críticos del campo eléctrico considerados en diversas configuraciones.

F.P. Espino-Cortes e I. Ramírez-Vázquez analizan el comportamiento del campo eléctrico en aisladores no cerámicos usando materiales compuestos ó atenuadores a base de hule silicón y partículas de carburo de silicio (SiC) y oxido de zinc (ZnO) para disminuir el valor del campo eléctrico [Espino, 2009].

Ashouri, Mirzaie y Gholami analizan la distribución de potencial a lo largo de aisladores estándar de porcelana mediante el método de los elementos finitos, considerando cambios en el número de aisladores, inclusión de anillos equipotenciales en la cadena, cambios en la longitud de la cruceta de la estructura y el efecto del viento en la cadena de aisladores[Mehdi, 2010]. Como parte de los resultados se tienen: a) una distribución más uniforme del potencial en la cadena de aisladores al incrementar la longitud de la cruceta, b) mejora de la distribución de potencial y decremento de la eficiencia al aumentar el número de unidades de la cadena y c) un incremento del potencial en los primeros aisladores de la cadena al desviarse hacia la estructura hasta un ángulo de 30°y un decremento del potencial en los primeros aisladores de la cadena al alejarse de la estructura hasta un ángulo de 30°.

Subba y Kumar analizan la distribución del campo para aisladores cerámicos empleando el método numérico de simulación de carga superficial (CSM, por sus siglas en inglés) [Subba, 2011].

Desarrollan un electrodo conformado de acero inoxidable y aluminio que se coloca en la región del perno ó pin del aislador para reducir el campo eléctrico máximo.

1.3. Objetivo de la tesis

Analizar el comportamiento del campo eléctrico en cadenas de aisladores de vidrio templado para diferentes niveles de tensión aplicando métodos numéricos para las siguientes aplicaciones: a) la interacción entre estructuras de transmisión y sus cadenas de aisladores; y b) la influencia del viento en la ubicación de las cadenas de aisladores con respecto a las estructuras.

1.4. Alcance de la tesis

Dentro de las consideraciones que no se han tomado en cuenta en los trabajos desarrollados para el estudio del campo eléctrico y distribución de potencial en cadenas de aisladores estándares de vidrio templado, usando el método de los elementos finitos, se encuentra el desplazamiento de las cadenas debido a la presencia de viento en las líneas de transmisión, el cual representa un fenómeno importante de estudio, ya que al cambiar las distancias de las cadenas con respecto al cuerpo de las estructuras de las torres de transmisión se incrementan los riesgos de falla a tierra.

El ángulo de balanceo de las cadenas de aisladores con respecto a la vertical puede encontrarse considerando la norma mexicana NOM-001-SEDE-2005[2006] y la especificación de la CFE,CPTT-DDLT-001/02 [CFE, 2009a], donde se señalan las presiones de viento a considerar para la evaluación de cargas mecánicas en líneas aéreas. De igual forma, el ángulo de desplazamiento de la cadena de aisladores se considera de acuerdo a lo definido por los documentos: “Guidelines for the evaluation of the Dielectric Strength of External Insulation” [CIGRE 72, 1992] y “Tower Top Geometry and Mid Span Clearances” [CIGRE 348, 2008].

El desarrollo de un modelo numérico tridimensional del comportamiento del campo eléctrico de las cadenas de aisladores considerando las estructuras de transmisión empleadas en México, aplicando el método de elementos finitos (FEM), representa una valiosa herramienta que contribuye a su mejor dimensionamiento y diseño. También permite el análisis de su

comportamiento ante diversos fenómenos como el causado por el desplazamiento transversal de las cadenas ante la presión del viento para determinados valores de ángulo de balanceo.

1.5. Estructura de la tesis

El presente trabajo está constituido por 5 capítulos. El primer capítulo es introductorio al tema de las cadenas de aisladores, se presentan las contribuciones representativas del estado del arte que estudia el comportamiento del campo eléctrico en los aisladores mediante la aplicación de métodos numéricos. Adicionalmente se plantean el objetivo, alcance y estructura del trabajo. El resto de los capítulos se describen a continuación.

El capítulo 2 define la estructura de las cadenas de aisladores convencionales, se describen métodos experimentales y numéricos establecidos para la determinación del campo eléctrico y la distribución de voltajes a lo largo de la cadena. Se plantea una descripción breve de la teoría electromagnética relevante y del método de los elementos finitos. Se señalan algunas opciones de paquetes computacionales disponibles para realizar análisis mediante métodos numéricos y sus características.

El capítulo 3 establece los modelos y procedimientos para la determinación del ángulo de balanceo de las cadenas de aisladores bajo estudio en este trabajo, acorde a lo establecido en la normatividad, especificaciones y reportes técnicos vigentes de la CFE, NMX y CIGRE para líneas de transmisión. Se plantean las bases del modelo numérico para la determinación del efecto del viento en las líneas de transmisión, causante de deflexión en los cables conductores y consecuentemente en las cadenas de aisladores.

El capítulo 4 describe los casos de estudio considerados en el trabajo y resultados obtenidos tomando en cuenta el comportamiento de las cadenas de aisladores en suspensión: a) sin el efecto de la carga de viento (a plomo) y b) bajo el efecto del viento para ángulos de desplazamiento ó balanceo de la cadena con respecto a un acercamiento con la estructura de transmisión. Los diversos modelos numéricos geométricos son establecidos acorde a información obtenida de [CFE, 1987&1999 &2000 & 2001 & 2004b] y fabricantes de aisladores [NGK, 2007].

El capítulo 5 establece las conclusiones obtenidas, aportaciones realizadas y áreas de oportunidad para trabajos futuros.

2

EL CAMPO ELÉCTRICO EN CADENAS DE AISLADORES

2.1. Introducción

El análisis del comportamiento del campo eléctrico y la distribución del potencial es de gran importancia para el diseño de aisladores. Las tres opciones disponibles para determinar el comportamiento del campo eléctrico en aisladores son los métodos analíticos, los experimentales y los numéricos [Tanushri, 2010]. Los métodos analíticos involucran el desarrollo de un circuito equivalente simplificado, consecuentemente no permite evaluar el campo eléctrico y distribución de potencial de manera efectiva, un incremento en la complejidad del modelo dificulta obtener la solución. Los métodos experimentales para la medición del campo eléctrico son confiables siempre y cuando las técnicas de medición no afecten el comportamiento natural del fenómeno. La desventaja de estos métodos es muchas veces el costo. Los métodos numéricos aproximan la solución del problema mediante la aplicación de técnicas numéricas que solucionan las ecuaciones que definen el comportamiento del campo eléctrico. La determinación de campos eléctricos y distribución de potencial mediante métodos numéricos (Ver Figura 2.1 como ejemplo del cálculo del potencial en una cadena de aisladores) ha mostrado ser útil, flexible y menos costosa comparada respecto a los métodos experimentales [IEEE Taskforce, 2008].

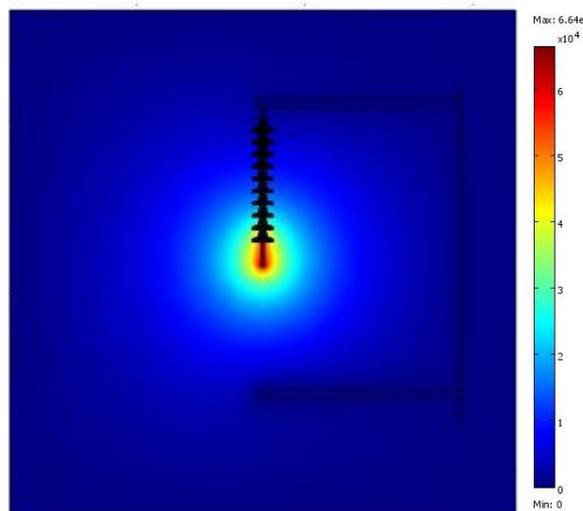


Figura 2.1. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV.

2.2. Estructura y diseño de cadenas de aisladores en líneas de transmisión

El comportamiento eléctrico de una línea de transmisión en operación depende primordialmente del aislamiento [Fink, 1996]. La Figura 2.2 muestra las partes de un aislador estándar de porcelana vidriada ó vidrio templado, donde se observan sus partes constitutivas. Las partes metálicas (calavera y perno) del aislador estándar se construyen con acero, hierro ó aluminio. La fabricación de los aisladores de suspensión se encuentra establecida conforme a la norma “American National Standard for Insulators—Wet-Process Porcelain and Toughened Glass—Suspension Type”[ANSI C29.2, 1999] y las pruebas tanto eléctricas como mecánicas están definidas en la norma “American National Standard for Electrical Power Insulators—Test Methods” [ANSI C29.1, 2002].

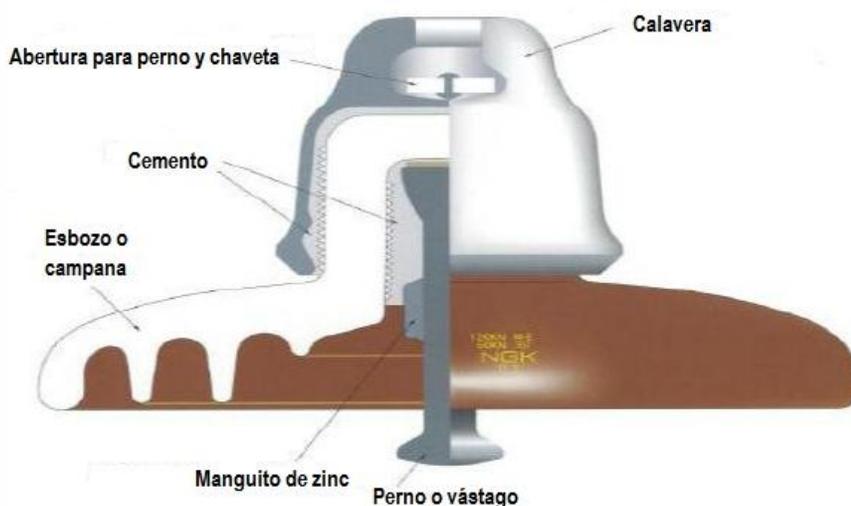


Figura 2.2. Partes de un aislador [NGK, 2007].

Las características generales de los aisladores se encuentran estandarizadas por normas internacionales y nacionales que para el caso de la CFE se encuentran definidas dentro de la norma de referencia “Aisladores tipo suspensión de porcelana ó de vidrio templado” [CFE, 2004a]. En la Tabla 2.1 y Figura 2.3 se observan las características generales de los aisladores 25SVC111 comúnmente empleados en México para líneas de transmisión acorde a la norma NRF-018-CFE [CFE, 2004a].

La determinación de la longitud de las cadenas de aisladores se establece con base en procedimientos definidos por estándares, que para el caso de la CFE son las normas mexicanas “Coordinación de Aislamiento – Parte 1 Definiciones, Principios y Reglas” [NMX, 1997] y

“Coordinación de Aislamiento – Parte 2 Guía de Aplicación” [NMX, 2004] al igual que especificaciones de la Comisión Federal de Electricidad [CFE, 1991 & 1995], donde se establecen los requisitos para las separaciones mínimas de los conductores de líneas aéreas con sus soportes y conductores adyacentes. La longitud de las cadenas de aisladores varía acorde a ciertas características (nivel de tensión, grado de contaminación, altitud sobre nivel del mar, distancias de paso y de fuga del aislador empleado) que deben ser establecidas para obtener valores seguros de aislamiento para las condiciones de operación a las que son sometidas.

Tabla 2.1. Características electromecánicas y dimensionales de aisladores [CFE, 2004a].

Características	Descripción corta		25SPC111	25SVC111
			25SPC111C	25SVC111C
Dimensiones	Diámetro nominal		mm	254
	Espaciamiento		mm	146
	Distancia mínima de fuga		mm	292
Eléctricas	Flameo a baja frecuencia	En seco	kV	80
		En húmedo	kV	50
	Tensión crítica de flameo	Al impulso positivo	kV	125
		Al impulso negativo	kV	130
Tensión de perforación a baja frecuencia		kV	110	
Mecánicas	Resistencia mecánica		kN	111
	Resistencia al impacto		Nm	7

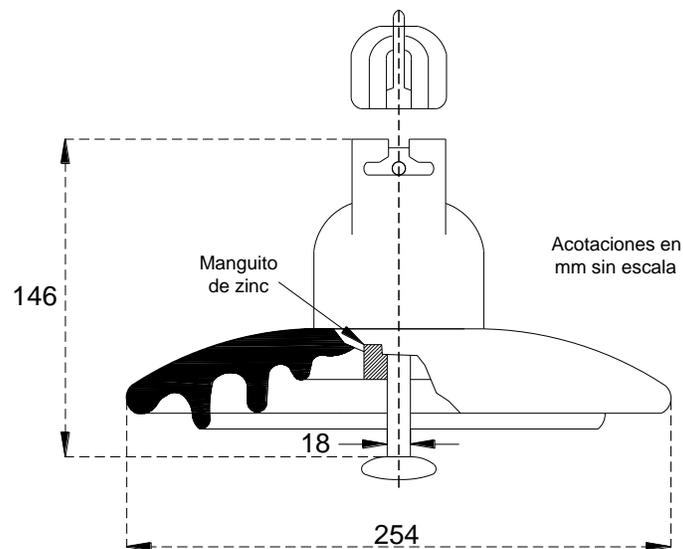


Figura 2.3. Dimensiones generales del aislador 25SVC111C [CFE, 2004a].

2.3. Campo eléctrico y distribución de potencial en cadenas de aisladores

El campo eléctrico y la distribución de potencial en cadenas de aisladores son parámetros importantes que deben ser conocidos y controlados desde las etapas de diseño y pruebas, con la finalidad de prevenir durante su operación un sobreesfuerzo en alguna sección de la cadena que produzca envejecimiento prematuro, fallas ó fenómenos no deseables, como las descargas parciales. Diversos factores afectan la distribución del campo eléctrico y el potencial en las cadenas, como son la geometría del aislador, configuración de la torre, geometría de los accesorios y herrajes, nivel de tensión eléctrica, distancia con respecto a otras fases [Tanushri, 2010].

Una representación simplificada de cadenas de aisladores se da mediante un circuito equivalente de capacitores como se muestra en la Figura 2.4, donde se observa que cada una de las cuatro unidades de la cadena conforma un capacitor C entre las partes metálicas que lo conforman (puntos de enganche que son la bola y la calavera) por el cual se genera una diferencia de potencial V_i . También se presenta una capacitancia C_g entre las partes metálicas de cada aislador y el cuerpo recto de la estructura de la línea de transmisión que se encuentra a potencial de tierra.

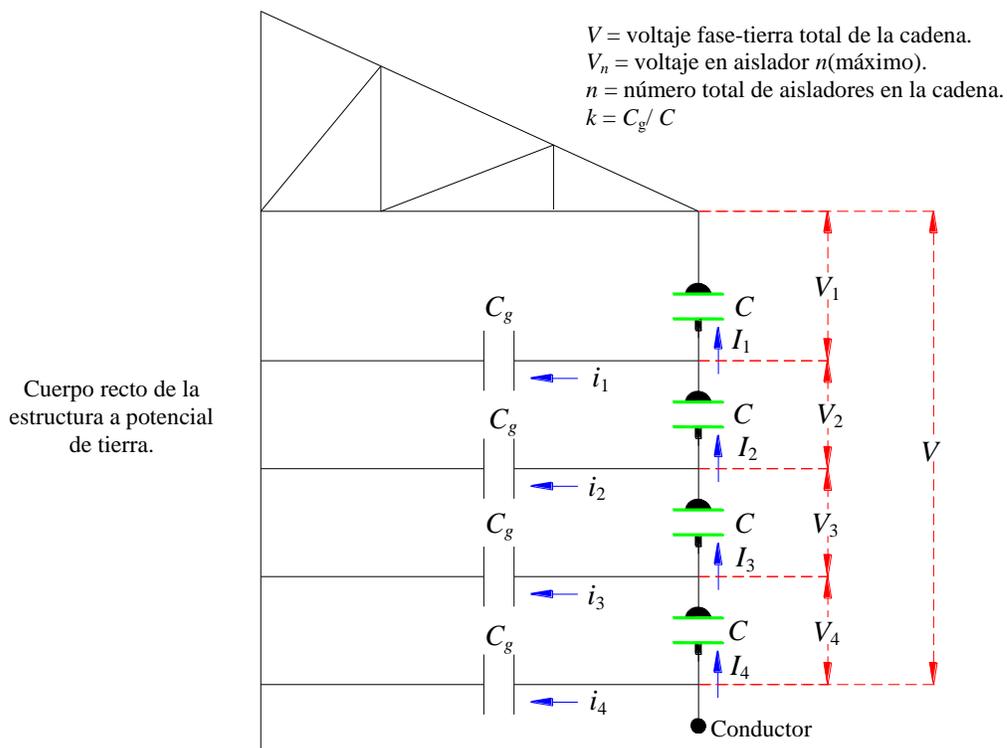


Figura 2.4. Circuito equivalente de cadena de aisladores [Still, 1927].

Los voltajes y corrientes obtenidos de una cadena de aisladores presentan un comportamiento no lineal de tal forma que las unidades más cercanas a la parte conductora ó energizada se encuentran más esforzadas eléctricamente que las alejadas de la misma. Una forma tradicionalmente usada para determinar el grado de esfuerzo eléctrico presente en la cadena es mediante el concepto de “eficiencia de la cadena” que se encuentra definido (Figura 2.4) mediante la expresión [Still, 1927]:

$$\text{Eficiencia de la cadena} = \left(\frac{V}{n \cdot V_n} \right) 100 \text{ [\%]} \quad (2.1)$$

Se ha observado que la eficiencia de las cadenas de aisladores asociada a la distribución del voltaje presenta mejoras cuando la relación k de las capacitancias obtenida a partir del circuito equivalente de la Figura 2.4 es pequeña, resultado de una menor cantidad de pérdidas y efecto capacitivo a tierra [Still, 1927; Izgi, 2008]. La Figura 2.5 muestra curvas ilustrativas de la distribución del voltaje en una cadena de aisladores de cinco unidades en relación al valor de k . Se observa que conforme k disminuye la eficiencia de la cadena aumenta a causa de una mejor distribución del potencial entre las unidades.

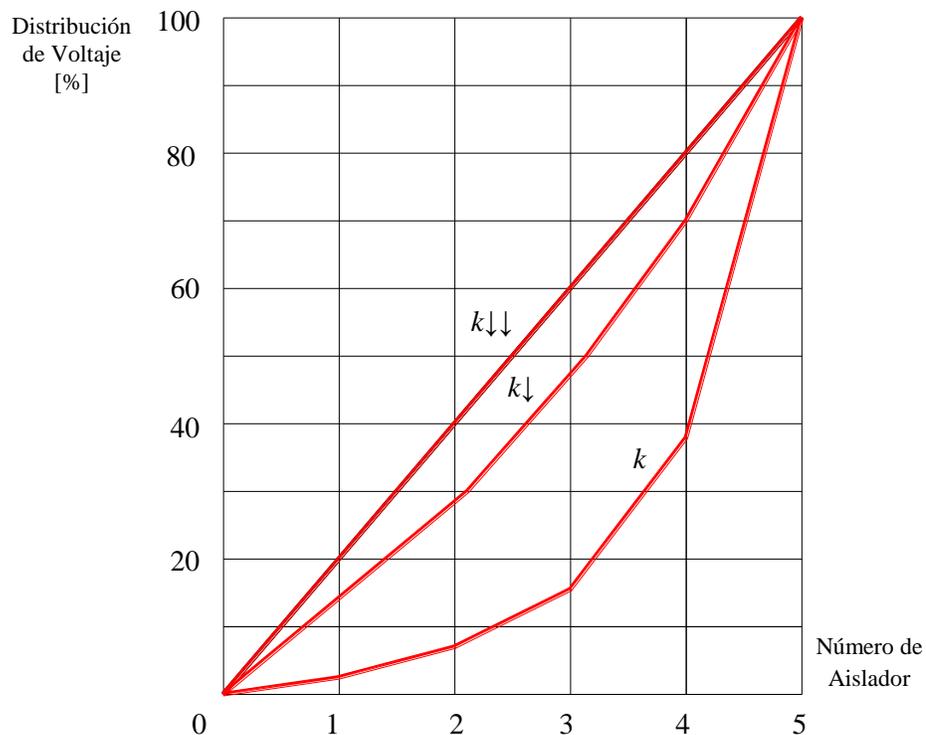


Figura 2.5. Distribución del voltaje entre las unidades de una cadena de aisladores [Still, 1927].

El modelo del circuito equivalente planteado en la Figura 2.4 presenta muchas simplificaciones como por ejemplo, no considera una resistencia para la parte dieléctrica del aislador (vidrio/porcelana y el cemento) ó especifica una capacitancia constante tanto mutua como a tierra. Otros factores no considerados por el modelo son la contaminación presente en los aisladores ó la posición de la cadena cuando es desplazada por viento. Por lo anterior, los resultados que arroja este modelo analítico simplificado del comportamiento eléctrico de las cadenas no son correctos y se presenta la necesidad de desarrollar otros modelos y métodos que definan el comportamiento eléctrico de la cadena de forma más real.

Los métodos experimentales y los análisis por métodos numéricos empleados para el estudio de la distribución del campo eléctrico y potencial en las cadenas de aisladores presentan ventajas ya que permiten considerar los fenómenos y características que los analíticos no pueden debido a la complejidad de su definición dentro del modelo.

2.3.1. Métodos experimentales para el análisis de campo eléctrico y distribución de potencial en aisladores

Los métodos experimentales involucran el desarrollo de dispositivos y equipos basados en el principio de que el campo eléctrico es proporcional a la densidad de flujo eléctrico [Khalifa, 1990]. Algunos de los dispositivos para medir el campo eléctrico son los sensores capacitivos, los medidores de flujo y las antenas dipolares [Que, 2002]. Estos dispositivos comúnmente están conformados de electrodos conductivos, cables y circuitos de medición; sin embargo presentan distorsiones del campo eléctrico debido a las conexiones metálicas. Los sistemas y equipos empleados actualmente para la medición del campo eléctrico emplean señales que se transmiten mediante fibra óptica de un sensor en alta tensión a una unidad receptora, de tal forma que solo se genera una pequeña distorsión de la distribución del campo eléctrico [Feser, 1984]. El tamaño del sensor es pequeño para alterar lo menos posible las mediciones. El sensor de Pockels presenta las siguientes ventajas: a) una medición directa del campo eléctrico, b) respuesta a cambios en el campo eléctrico sobre un amplio rango de frecuencias (de D.C. hasta GHz) y poca distorsión [Que, 2002].

Un estudio comparativo publicado por R. Parraud [Que, 2002] de diferentes métodos de medición del campo eléctrico señala dentro de los sensores empleados: a) medidores de potenciales AC, b) sensores esféricos capacitivos con enlaces de datos ópticos y c) sensores electro-ópticos de cuarzo cúbicos. Parraud concluyó que los primeros son poco confiables debido a la influencia de los sensores de medición en la distribución del potencial, los segundos presentan buenas correlaciones en la región de los electrodos pero diferencias significativas cerca de los electrodos conectados a tierra, mientras que los últimos son una buena elección respecto a los valores medidos y los calculados del campo eléctrico, con la excepción de la cercanía a los electrodos debido a la distorsión del campo por la ubicación de los sensores de medición.

La Universidad Nacional de Colombia [GAMMA, 2005] desarrolló diversos métodos experimentales para evaluar la distribución del potencial en aisladores de vidrio dentro de los cuales se encuentran: a) el método de la disrupción que utiliza técnicas fotográficas de exposición prolongada; y b) el método de las sustancias luminosas que utilizan una mezcla de un líquido dieléctrico con una sustancia sólida conductora cristalina en polvo fluorescente a base de trementina y fluoresceína.

2.3.2. Métodos numéricos para el análisis de campo eléctrico y distribución de potencial en aisladores

Los análisis por métodos numéricos involucran la solución (aproximación) de las ecuaciones diferenciales parciales asociadas a las ecuaciones de Maxwell sujetas a condiciones de frontera. Su aplicación en el caso de geometrías complejas para las que se desea estudiar el comportamiento del campo eléctrico y la distribución de potencial como los aisladores representa ventajas económicas, de tiempo y flexibilidad. Los métodos numéricos de análisis comúnmente empleados para el cálculo de la distribución del campo eléctrico en cadenas de aisladores son:

- Método de simulación de carga (CSM)
- Método de elementos frontera (BEM)
- Método de los elementos finitos (FEM)
- Método de las diferencias finitas (FDM)

Los métodos de análisis del campo eléctrico se dividen en dos categorías [Zhou, 1993; Que, 2002]: los métodos de frontera, de momentos ó distribución de fuente -fronteras abiertas- (CSM y BEM) y los métodos de dominio espacial, de dominio del tiempo y aproximación de campo -fronteras cerradas- (FEM y FDM).

El concepto básico del CSM es remplazar la distribución de carga de los conductores y las cargas de polarización en las interfaces dieléctricas por una gran cantidad de cargas discretas ficticias. Las magnitudes de estas cargas deben ser calculadas tal que su efecto integrado satisfaga las condiciones de frontera. El potencial debido a cargas superficiales desconocidas puede ser aproximado por tres formas de arreglos de cargas ficticias concentradas: línea, anillo y cargas puntuales. Estas cargas pueden ser ubicadas en posiciones apropiadas, que usualmente se encuentran dentro de la superficie del conductor ó electrodo, fuera del espacio en el cual el campo eléctrico será determinado [Khalifa, 1990]. Una combinación adecuada de estas tres formas de cargas puede efectuarse para simular casi cualquier sistema práctico de electrodos. El CSM puede emplearse para resolver problemas de fronteras abiertas y es aplicado a problemas de campo eléctrico tridimensionales sin simetría axisimétrica. Sin embargo, un problema es la ubicación subjetiva de las cargas de simulación. También, es difícil o imposible calcular el campo eléctrico cerca de electrodos muy delgados debido a que las cargas ficticias que aproximan el campo deben estar dentro de los electrodos.

El BEM se basa en la representación de las superficies de las regiones bajo estudio en lugar de modelar su interior. Existen dos clases de BEM, el directo y el indirecto. El indirecto no resuelve el potencial directamente. Una fuente equivalente que sostiene el campo se encuentra al forzarla a satisfacer las condiciones de frontera prescritas bajo una función de Green en el espacio libre, que relaciona la localización y efecto de la fuente en cualquier punto de la frontera. Una vez que la fuente es determinada se pueden obtener los potenciales en cualquier punto. En el método directo, el valor de la función, el potencial y su derivada normal a lo largo de la frontera son desconocidas. Las ecuaciones integrales son discretizadas a través de las fronteras empleando el método Galerkin. Ajustando las condiciones de frontera a los nodos, se obtiene un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales. La solución de estas ecuaciones resulta en valores de frontera del potencial y sus derivadas normales. Una ventaja significativa de este método consiste en que las regiones de aire entre sólidos no necesitan ser discretizadas, simplificado el proceso de creación de la malla [Haddad, 2004].

El FEM es un método numérico de solución de las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial [Que, 2002]. La característica básica del método FEM es dividir el espacio del problema entero, incluyendo las regiones aledañas, en un número de subregiones no separadas llamadas “elementos finitos” (ver Figura 2.6 para la discretización en elementos finitos de una cadena de aisladores). Este proceso de discretización se llama mallado. Dentro de cada elemento geométrico, la variable desconocida es aproximada comúnmente por polinomios con valores nodales como coeficientes. El potencial eléctrico dentro de cada elemento es una interpolación de los potenciales en sus vértices. Mediante el uso de métodos de aproximaciones residuales, las ecuaciones diferenciales parciales son reducidas a una ecuación matricial definida positiva, simétrica y dispersa. Debido a que el tamaño y forma de los elementos es arbitrario, el método resulta flexible y funciona para problemas de geometría complicada. El FEM es más efectivo para problemas con fronteras cerradas. Si el problema es muy grande un número mayor de elementos finitos es necesario y los cálculos son mayores [Haddad, 2004].

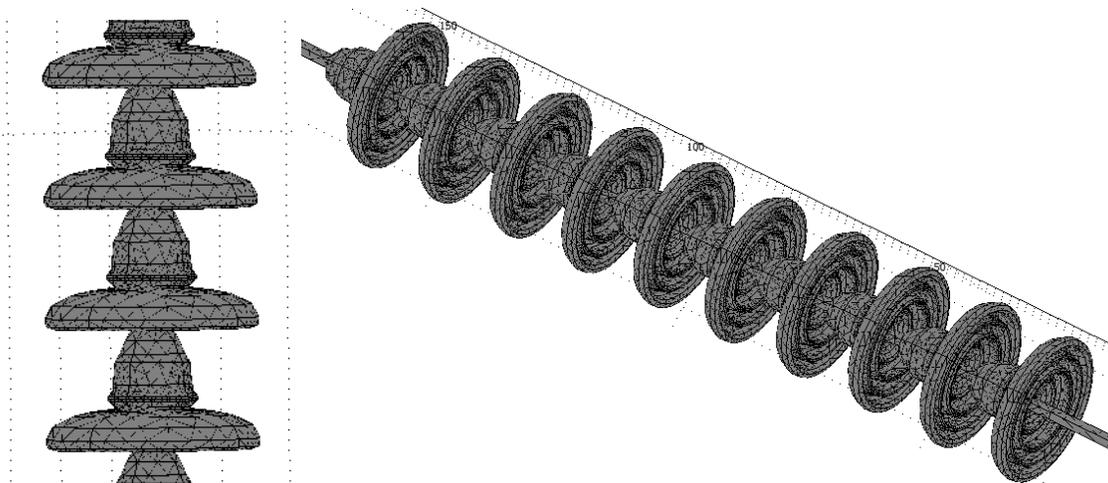


Figura 2.6. Malla generada de elementos finitos de una cadena de aisladores.

El FDM es una aproximación para resolver ecuaciones diferenciales parciales. Reemplaza un problema de campo continuo por uno de campo discreto con nodos regulares finitos. Este método utiliza una expansión en series de Taylor trucada en cada coordenada y aplica un conjunto de puntos finitos discretizados para aproximar las derivadas parciales de la función desconocida [Haddad, 2004]. Las ecuaciones en derivadas parciales son entonces transformadas en un conjunto de ecuaciones algebraicas. El FDM es efectivo para obtener una solución aproximada dentro de un dominio regular. Si una región contiene diferentes materiales y formas complejas, el FEM es mejor.

2.4. Fundamentos de teoría electromagnética

Las leyes que rigen el comportamiento de los campos electromagnéticos se encuentran definidas mediante cuatro ecuaciones conocidas como las ecuaciones de Maxwell [Hyatt, 2001]. Dependiendo de las características físicas particulares del campo (independiente ó no del tiempo), éste puede ser clasificado de tres formas: a) invariante en el tiempo ó lo suficientemente lento para ser considerado como cuasi-estático(en equilibrio), b) variante en el tiempo con una razón de cambio (frecuencia) baja tal que se presentan corrientes de remolino y c) con una razón de cambio alta ocasionando que los campos consideren corrientes de desplazamiento y comportamiento de onda como por ejemplo en las antenas [Binns, 1992].

Dentro de las ecuaciones de Maxwell se encuentra la que expresa la ley de Gauss para los campos eléctricos, la que establece que el flujo eléctrico total ψ que pasa a través de una superficie cerrada es igual a la carga que encierra la superficie:

$$\psi = \oint_S \bar{D} \cdot d\bar{S} = \oint_V \rho_v dv \quad (2.2)$$

donde S es la frontera del volumen v , \bar{D} es la densidad de flujo eléctrico y ρ_v es la densidad volumétrica de carga eléctrica. A partir del teorema de la Divergencia, se tiene que la ley de Gauss toma la forma diferencial:

$$\nabla \cdot \bar{D} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\oint_S \bar{D} \cdot d\bar{S}}{\Delta v} = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = \rho_v \quad (2.3)$$

La ecuación (2.2) es la primera de las cuatro ecuaciones de Maxwell que aplica para campos electrostáticos, señalando que la cantidad de flujo eléctrico por unidad de volumen dejando una unidad de volumen es igual a la densidad de carga en el volumen.

La relación constitutiva que existe entre la densidad de campo eléctrico (\bar{D}) y la intensidad de campo eléctrico (\bar{E}) está dada por:

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (2.4)$$

donde ϵ es la permitividad. En el caso de campos eléctricos estáticos se puede demostrar que las ecuaciones de Maxwell llevan a una ecuación diferencial parcial conocida como la “ecuación de Poisson”, con la cual se puede determinar de manera única al campo, si se conoce las

distribuciones de carga y las condiciones de frontera de la región analizada. Ante la ausencia de fuentes de carga la ecuación de Poisson se simplifica a la ecuación de Laplace.

Asociado al campo eléctrico, se encuentra el concepto de diferencia de potencial que se define como el trabajo realizado por una fuerza externa que desplaza una carga eléctrica de un punto a otro dentro de un campo eléctrico.

Para la determinación del campo eléctrico en los aislamientos de sistemas de alta tensión en corriente alterna, los métodos de solución normalmente consideran que las corrientes en los aislamientos son despreciables, ya que la permitividad ϵ es mucho mayor a la conductividad σ [Asenjo, 1997]. El campo electrostático en un sistema puede determinarse mediante la distribución del potencial dentro de una región. La ley de Gauss para campos electrostáticos establece que (ver ecuaciones (2.3) y (2.4)):

$$\nabla \cdot \epsilon \bar{E} = \rho_v \quad (2.5)$$

El valor de la magnitud de intensidad del campo eléctrico, que está dado por el máximo valor de la relación de cambio del potencial con la distancia, es normal a las superficies equipotenciales generadas por el potencial. Debido a que el campo eléctrico puede expresarse en términos del potencial escalar V mediante su gradiente [Hyatt, 2001]:

$$\bar{E} = -\nabla V \quad (2.6)$$

La expresión (2.3) se puede reescribir como:

$$\nabla \cdot \epsilon(-\nabla V) = \rho_v \quad (2.7)$$

ó,

$$\epsilon \nabla^2 V = -\rho_v \quad (2.8)$$

si la permitividad del sistema es constante. Para sistemas más generales (como en cadenas de aisladores) la permitividad no es constante y es necesario resolver la ecuación (2.7). La ecuación (2.7) se conoce como la ecuación de Poisson y aplica para medios no homogéneos donde la permitividad no es constante. En el caso de que $\rho_v = 0$, es decir cuando la densidad de carga es nula, se tiene que [Hyatt, 2001]:

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla V = 0 \quad (2.9)$$

ó,

$$\varepsilon \nabla^2 V = 0 \quad (2.10)$$

La expresión (2.9) se conoce como la ecuación de Laplace y es aplicable a cualquier configuración de electrodos ó conductores para los cuales se presentan condiciones de frontera establecidas, permitiendo a su vez conocer la distribución del potencial una vez que es resuelta. La expresión (2.10) es la ecuación de Laplace para medios homogéneos.

2.5. El método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos es una técnica numérica utilizada para resolver ecuaciones diferenciales parciales y ordinarias. El FEM transforma problemas de región continua en una subdivisión de elementos discretos (normalmente triangulares en modelos bidimensionales) representando a la región de estudio. La solución que se obtiene del problema es a través del potencial aproximado de forma polinomial en los nodos correspondientes a los vértices de cada elemento y que puede presentar distintas propiedades [Haddad, 2004].

El FEM se basa en el concepto de obtener ecuaciones diferenciales después de aplicar el teorema de Green a las ecuaciones de Maxwell [Tanushri, 2010]. Los pasos que definen el FEM son:

- Discretización de la solución en sub-regiones por elementos. La función desconocida de cada elemento triangular μ_e es aproximada mediante los valores nodales μ_i, μ_j, μ_m (ver Figura 2.7) y la función de forma N_k^e ,

$$\mu_e = \sum_k N_k^e \mu_k \quad (k = i, j, m) \quad (2.11)$$

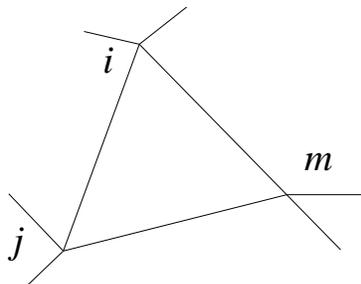


Figura 2.7. Elemento triangular.

- Aplicando el principio de residuales ponderados se deriva la ecuación matricial para los elementos, que para elementos con tres nodos queda representada como,

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} & K_{im} \\ K_{ji} & K_{jj} & K_{jm} \\ K_{mi} & K_{mj} & K_{mm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_i \\ \mu_j \\ \mu_m \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Donde K es la matriz de coeficientes de μ_e y obtenida por los métodos de Variacionales o de Galerkin [Zhou, 1993].

- La ecuación matricial del sistema se obtiene mediante el ensamble de las ecuaciones elementales como,

$$K \mu = B \quad (2.13)$$

Siendo μ un vector de orden N (número de nodos) que contiene todos los valores nodales del dominio. La matriz K es de orden $N \times N$ y se caracteriza por ser dispersa, simétrica y positiva en la mayoría de los casos. La matriz B contiene los términos fuente incluidos en las ecuaciones de Poisson y las condiciones de frontera conocidas.

2.6. Programas de cómputo aplicados al análisis de campo eléctrico por métodos numéricos

Se encuentran disponibles diversas opciones computacionales para el análisis mediante métodos numéricos en el mercado. En esta sección se describen características clave de programas con la finalidad de tener un panorama más amplio respecto a sus bondades para seleccionar uno acorde a las necesidades y restricciones que se presentan en este trabajo de tesis.

Dentro de las opciones disponibles para el análisis del campo eléctrico se encuentran: [Coulomb, 2012; ANSYS/Emag, 2012; Maxwell, 2012; COMSOL Multiphysics, 2012; MATLAB, 2012] mediante la caja de herramientas de ecuaciones diferenciales parciales, [QuickField, 2012; Opera, 2012; Flux3D, 2012]. Coulomb fue programado utilizando el BEM y ha sido empleado para el análisis de aisladores compuestos considerando modelos tridimensionales [Que, 2002]; por su parte [ANSYS/Emag, 2012] está basado en el FEM y su desarrollo ha sido principalmente encaminado a problemas de ingeniería estructural y térmica y en menor medida a la ingeniería electromagnética. [Maxwell, 2012] también se basa en el FEM y su orientación es hacia la

ingeniería electromagnética.[Flux3D, 2012]tiene un enfoque total sobre la parte de estudios electromagnéticos tridimensionales. Finalmente [COMSOL Multiphysics, 2012] utiliza el FEM para la solución de problemas en varias áreas del conocimiento siendo la electromagnética tridimensional una de ellas.

Para el análisis de la distribución del campo eléctrico se han presentado recomendaciones a favor de los métodos integrales (BEM) respecto a los diferenciales (FEM) [Chakravorti, 2000], ya que la demanda de recursos computacionales particularmente en el caso de problemas con fronteras abiertas es mayor para los métodos diferenciales. La axisimetría y consideración de modelos en dos dimensiones son otros de los conceptos que permiten definir un problema de forma más simple respecto al tiempo de solución como por ejemplo en el caso de las máquinas eléctricas y aislamientos.

En este trabajo se utiliza COMSOL Multiphysics como la herramienta para efectuar el análisis del campo eléctrico debido a las ventajas que ofrece para la realización de los casos de estudio tridimensionales y las facilidades respecto a la definición de las fronteras y solución del problema aplicando el FEM.

3

ÁNGULO DE BALANCEO EN CADENAS DE AISLADORES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

3.1. Introducción

La operación de las líneas de transmisión requiere contemplar la seguridad y confiabilidad en el funcionamiento de todos los elementos que la componen. En el caso de las cadenas de aisladores, su diseño involucra aspectos mecánicos y eléctricos que deben ser evaluados para lograr el mejor desempeño posible.

Uno de los fenómenos que se presenta en cadenas de aisladores, y en todas las partes que constituyen una línea de transmisión, es el viento. Su presencia genera cargas mecánicas que afectan la operación mecánica y eléctrica de las cadenas al modificar su posición con respecto a la estructura que las sostienen. El cambio de la posición angular de la cadena de aisladores a causa del viento con respecto a su posición original (sin viento) es conocido como “ángulo de balanceo”. El ángulo de balanceo modifica las distancias dieléctricas del cable conductor de energía, que se encuentra enganchado a la cadena de aisladores, respecto a la estructura, afectando los campos eléctricos en la línea de transmisión y sus elementos. Estos cambios ocasionan esfuerzos eléctricos que afectan el desempeño de las cadenas de aisladores y pueden ocasionar envejecimiento prematuro, flameo, etcétera [EPRI, 2005].

3.2. Normas y especificaciones

La determinación del ángulo de balanceo en los conductores y cadenas de aisladores se encuentra definida dentro de normas, especificaciones y guías de diseño acorde a estudios, pruebas realizadas, modelos desarrollados y experiencias obtenidas por parte de las empresas ó grupos de trabajo [Edison Electric Institute, 1968; Kiessling, 2003; CIGRE 348, 2008]. Dentro de las consideraciones generales establecidas para determinar el ángulo de balanceo se encuentra la evaluación del viento perpendicular a la línea de transmisión para obtener el mayor

desplazamiento de cables y aisladores, obteniendo así las distancias dieléctricas mínimas con respecto al cuerpo recto de las estructuras y los obstáculos como arboles ó construcciones a lo largo de la trayectoria.

Debido a que los fenómenos atmosféricos son diferentes y aleatorios, dependiendo de la zona geográfica, es importante que el ángulo de balanceo quede establecido acorde a las condiciones de viento particulares de la línea de transmisión proyectada, con la finalidad de que el dimensionamiento de las estructuras sea óptimo respecto a la seguridad y costo. Organizaciones internacionales (Weather World Organization) y nacionales (CONAGUA) son las encargadas de definir las metodologías y realizar las mediciones de parámetros atmosféricos como temperatura, viento, humedad, etc. mientras que otros organismos normalizadores se encargan de establecer los procedimientos para el cálculo de las cargas mecánicas por viento para todo tipo de estructuras siendo de las principales la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) [CFE, 2009b].

La aplicación de paquetes computacionales de diseño como el PLS-CADD [2012] permite determinar los ángulos de balanceo para los diseños de proyectos de líneas de transmisión, con la finalidad de verificar si el desplazamiento por viento del conductor sobrepasa un libramiento especificado por el usuario. Sin embargo, el enfoque de estos programas es hacia la parte estructural de cargas mecánicas en los elementos, y no en la parte del análisis del comportamiento eléctrico del diseño de la línea y sus elementos.

Los documentos considerados en este trabajo para la evaluación del ángulo de balanceo en cadenas de aisladores son: la norma oficial mexicana NOM-001-SEDE-2005, [2006], “Instalaciones Eléctricas (utilización)”; la especificación CPTT-DDLT-001/02 de la CFE [2009a] y los reportes técnicos “Tower top geometry and midspan clearances” [CIGRE 348, 2008] y “Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation” [CIGRE 72, 1992].

3.2.1. NOM-001-SEDE-2005

La NOM-001-SEDE-2005 se encuentra enfocada hacia el establecimiento de especificaciones y lineamientos de carácter técnico que deben satisfacer las instalaciones destinadas principalmente a la utilización de la energía eléctrica en forma segura para la

protección de personas contra los efectos eléctricos y térmicos. Es importante mencionar que la NOM-001-SEDE-2005 no es una guía de diseño.

El artículo 922-12 inciso b) asociado a la separación horizontal entre conductores de línea establece: *En aisladores de suspensión. Cuando se usen aisladores de suspensión con movimiento libre, la separación entre conductores debe aumentarse para que, al inclinarse una cadena de aisladores hasta formar un ángulo de 30 grados con la vertical, la separación sea igual ó mayor que la obtenida por medio del inciso a) anterior.*

El inciso a) se refiere a la separación horizontal considerando soportes fijos.

El artículo 922-31 inciso b) asociado a las separaciones horizontal y vertical entre conductores soportados en diferentes estructuras establece que: *Ambos conductores deben analizarse desde su posición de reposo hasta un desplazamiento ocasionado por una presión de viento de 29 kg/m², con flecha inicial y final a 16°C sin viento y con flecha inicial y final a 50°C sin viento. La presión de viento puede reducirse a 20 kg/m² en áreas protegidas por edificios u otros obstáculos. Cuando se usen aisladores de suspensión con movimiento libre el desplazamiento de los conductores debe incluir la inclinación de la cadena de aisladores.*

Acorde a lo determinado en el artículo 922-12b) se considera un ángulo de balanceo del aislador de 30 grados con respecto a la vertical. La determinación de dicho ángulo no se precisa dentro de la NOM. Sin embargo, se toma como uno de los casos de estudio al ser definida por una norma oficial nacional que considera valores para garantizar la seguridad de las personas.

Otras metodologías [CIGRE 348, 2008; CIGRE 72, 1992; CFE, 2009a] definen de forma más precisa el ángulo de balanceo por lo que son también incluidas en el presente trabajo para obtener un mejor entendimiento del fenómeno y su determinación.

3.2.2. CIGRE 348 y 72

Para el diseño de las estructuras de transmisión es de suma importancia mantener los libramientos de las partes energizadas respecto a tierra. Los libramientos dependen de la posición de los conductores y aisladores, los cuales son variables respecto a la acción del viento en estos elementos. Consecuentemente, el viento representa un parámetro importante para determinar la

posición de los elementos y definir así los claros, además de ser preponderante en el cálculo mecánico y estructural de las líneas de transmisión.

Para la determinación de la posición del aislador es necesario tener conocimiento de la distribución de la velocidad del viento en el tiempo. Particularmente la presión ó carga de viento perpendicular a los aisladores, es causante de un ángulo de balanceo máximo. En el caso de viento constante y estable a lo largo de la línea de transmisión, la determinación de un ángulo de balanceo es sencilla. Sin embargo, las fluctuaciones del viento afectan de forma considerable el ángulo de balanceo. Por ejemplo, viento con ráfagas pico actuantes durante periodos de tiempo muy cortos (2 segundos) no serán causantes de un ángulo de balanceo debido a que la masa de los aisladores necesita ser previamente acelerada. Por otro lado, velocidades de viento con valores promedio de suficiente tiempo son las causantes de cambios en el ángulo de balanceo de los aisladores.

En el documento CIGRE 348 [2008] se establece que bajo las condiciones de un viento estable ó moderado causante de un ángulo de balanceo pequeño y frecuente, los libramientos deben ser suficientes para soportar las sobretensiones causadas por descargas atmosféricas y maniobras con una probabilidad mayor al 90% en la línea de transmisión. Por otro lado, los vientos extremos ó máximos son eventos raros de tal forma que su coincidencia con sobretensiones por descargas atmosféricas ó por maniobra son poco probables. Consecuentemente, los diseños deben cumplir que bajo condiciones de viento extremo los libramientos establecidos soporten la tensión nominal del sistema.

Dentro del documento CIGRE 348 [2008] se encuentra información recabada de prácticas internacionales en diversos países para la determinación de ángulo de balanceo de cadenas de aisladores. En este documento, se observan que las condiciones atmosféricas preferentemente evaluadas por diversos países para la determinación del ángulo de balanceo y los libramientos asociados, con respecto a lo definido en la norma europea EN 50341-1[2009], son:

- Viento estable ó moderado con máxima temperatura del conductor para esfuerzos de descargas atmosféricas y maniobra (76% de aplicación).
- Viento extremo con periodo de retorno de 50 años para esfuerzos de tensión nominal del sistema (68% de aplicación).

Para la determinación del ángulo de balanceo en cadenas de aisladores, los principales parámetros a considerar son la velocidad, dirección y periodo de tiempo del viento. Acorde a resultados de varias investigaciones (Figura 3.1) se ha observado que los valores determinados teóricamente para el ángulo de balanceo son mayores a los presentados en la realidad CIGRE 348 [2008].

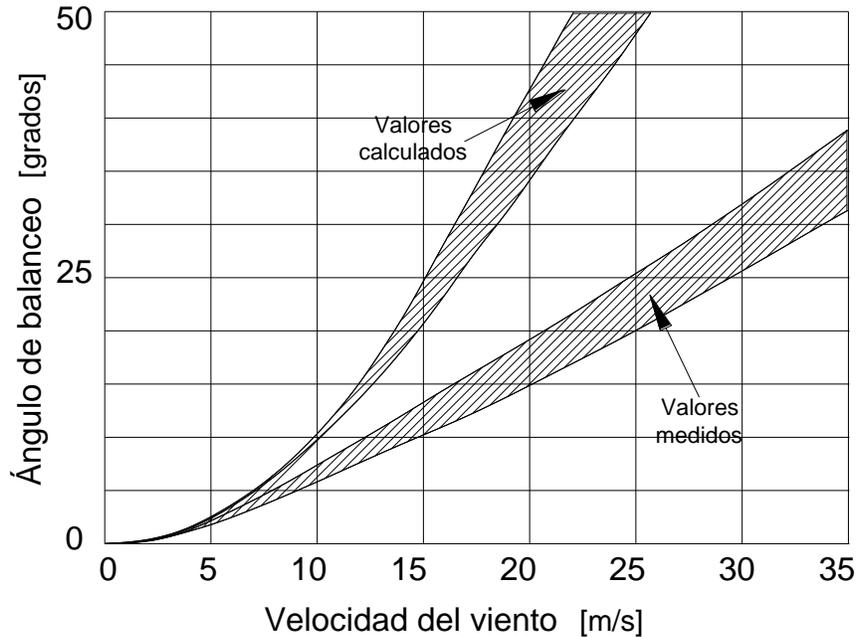


Figura 3.1.Valores calculados y medidos del ángulo de balanceo respecto a la velocidad del viento [CIGRE 348, 2008].

Dentro de las expresiones consideradas como parte del documento CIGRE 348 [2008], para determinar el ángulo de balanceo (ϕ) de cadenas de aisladores (Figura 3.1), se tiene la expresión (3.1) que considera las cargas mecánicas de viento y peso en la cadena de aislamiento (Figura 3.2):

$$\tan\phi = \frac{\left[n \cdot \left(\frac{\rho}{2} \right) \cdot V_p^2 \cdot C_{XC} \cdot d \cdot L_W + \left(\frac{F_{W_{ins}}}{2} \right) \right]}{\left[n \cdot W_C + \left(\frac{W_{ins}}{2} \right) \right]} \quad (3.1)$$

donde:

ϕ = ángulo de balanceo del aislador [°].

n = número de conductores agrupados ó en haz.

ρ = densidad del aire [kg/m³].

V_p = velocidad del viento [m/s] (ráfaga pico).

C_{XC} = coeficiente de arrastre de los conductores (1,0).

d = diámetro del conductor [m].

L_W = claro de viento [m].

$F_{W_{ins}}$ = carga de viento en la cadena de aisladores [N].

W_C = peso del conductor [N].

W_{ins} = peso del conjunto de aislamiento [N].

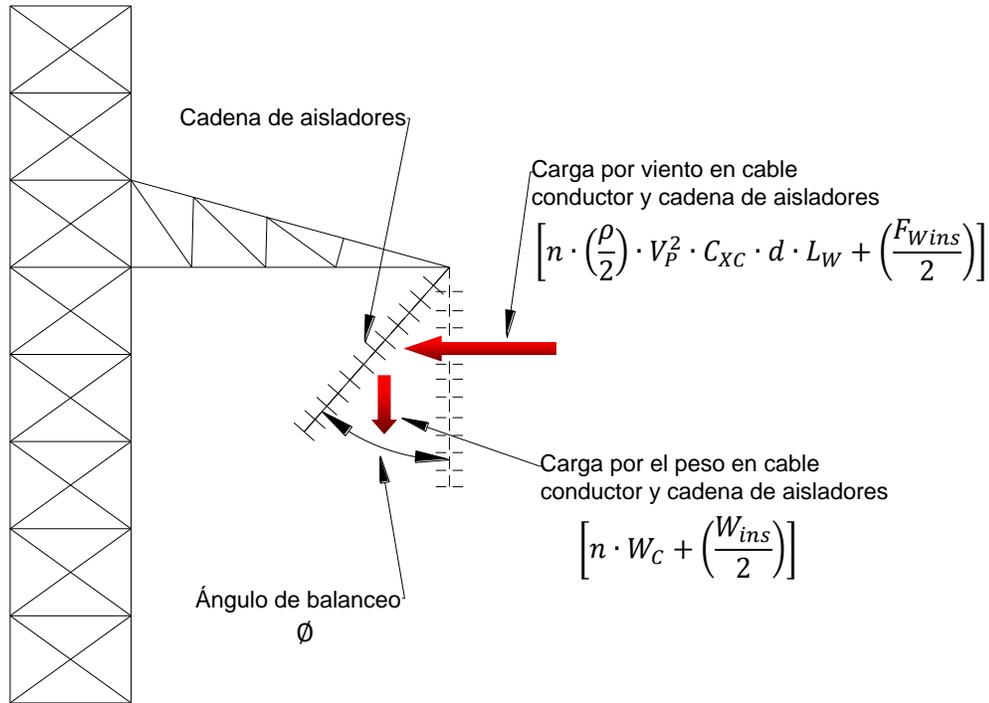


Figura 3.2. Cargas mecánicas por viento y peso en cadena de aisladores para determinación de ángulo de balanceo.

Como parte de las consideraciones para la evaluación de la velocidad del viento, se observa que conforme aumenta la altura sobre el nivel del terreno, la velocidad aumenta debido a que no se presenta turbulencia causada por la rugosidad del terreno. Por lo tanto, es importante esta consideración al evaluar las cargas por viento en los conductores y las cadenas de aisladores, ya que afectan directamente el ángulo de balanceo.

La carga por viento en los conductores, actuando de forma perpendicular a los mismos, queda determinada mediante,

$$F_{WC} = n \cdot q_Z \cdot C_{XC} \cdot G_C \cdot G_L \cdot d \cdot L_W \quad (3.2)$$

donde:

$q_Z = \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot V_Z^2 =$ presión del viento correspondiente a una altura determinada (Z)
sobre el terreno [N/m^2].

Siendo,

$$V_Z = V_R \left(\frac{Z}{Z_R}\right)^\alpha = \text{velocidad de viento promedio [m/s].}$$

Z_R = la altura de referencia (10 metros sobre el nivel del terreno ya que es la altura de ubicación de los medidores de velocidad).

V_R = velocidad de viento de referencia [m/s].

α = es un factor acorde al tipo de terreno.

G_C = factor de ráfaga del conductor dependiente de la categoría de terreno y altura sobre el terreno.

G_L = factor de claro.

Los factores de ráfaga y de claro representan parámetros importantes para la determinación del ángulo de balanceo debido a que su valor cambia acorde a la normatividad considerada. Los valores establecidos por las normas europeas EN 50341-1[2009], EN 50341-3-4[2011] (Alemana) y IEC 60826[2003] presentan diferencias siendo la EN 50341-3-4 [2011] la que define valores menores de los factores, por lo que el ángulo de balanceo obtenido es menor.

La determinación del ángulo de balanceo promedio de un conjunto de aislamientos respecto a la presión promedio del viento, sobre un rango de cinco a diez minutos de periodo, recomendada por CIGRE 348 [2008], queda expresada por,

$$\phi_{ins} = \tan^{-1} \left[q_Z \frac{C_{XC} \cdot G_C \cdot G_L \cdot d \cdot n \cdot L_W + \left(\frac{C_{Xins} \cdot A_{ins}}{2}\right)}{m_C \cdot g \cdot n \cdot L_C + \left(\frac{M_{ins} \cdot g}{2}\right)} \right] \quad (3.3)$$

donde:

ϕ_{ins} = ángulo de balanceo del aislador [°].

C_{Xins} = coeficiente de arrastre del conjunto de aislamiento (1,2).

A_{ins} = área del conjunto de aislamiento expuesta al viento [m^2].

F_{Wins} = carga de viento en la cadena de aisladores [N].

m_C = masa lineal del conductor [kg/m].

M_{ins} = masa del conjunto de aislamiento [kg].

g = aceleración gravitacional [9,81 m/s^2].

L_c = claro de peso del conductor [m].

El término $m_c \cdot g \cdot L_c$ es el peso efectivo del conductor tomando en consideración las diferencias del nivel de los puntos de enganche entre torres adyacentes.

Dentro de los experimentos realizados para la determinación del ángulo de balanceo se tienen los realizados por Leibfried y Morsen Alemania (Figura 3.3) [Leibfried, 1964] y los realizados por Houle, Ghannoum y Hardy (Figura 3.4) en Canadá [Houle, 2000]. Como parte de los resultados arrojados en Alemania por Leibfried y Morsse presentan variaciones importantes en el ángulo de balanceo acorde al periodo de tiempo considerado de la velocidad del viento, y que los ángulos de balanceo medidos se mantienen debajo de los determinados teóricamente usando velocidades pico de viento pero correspondiendo al comportamiento de las ecuaciones (Figura 3.1).

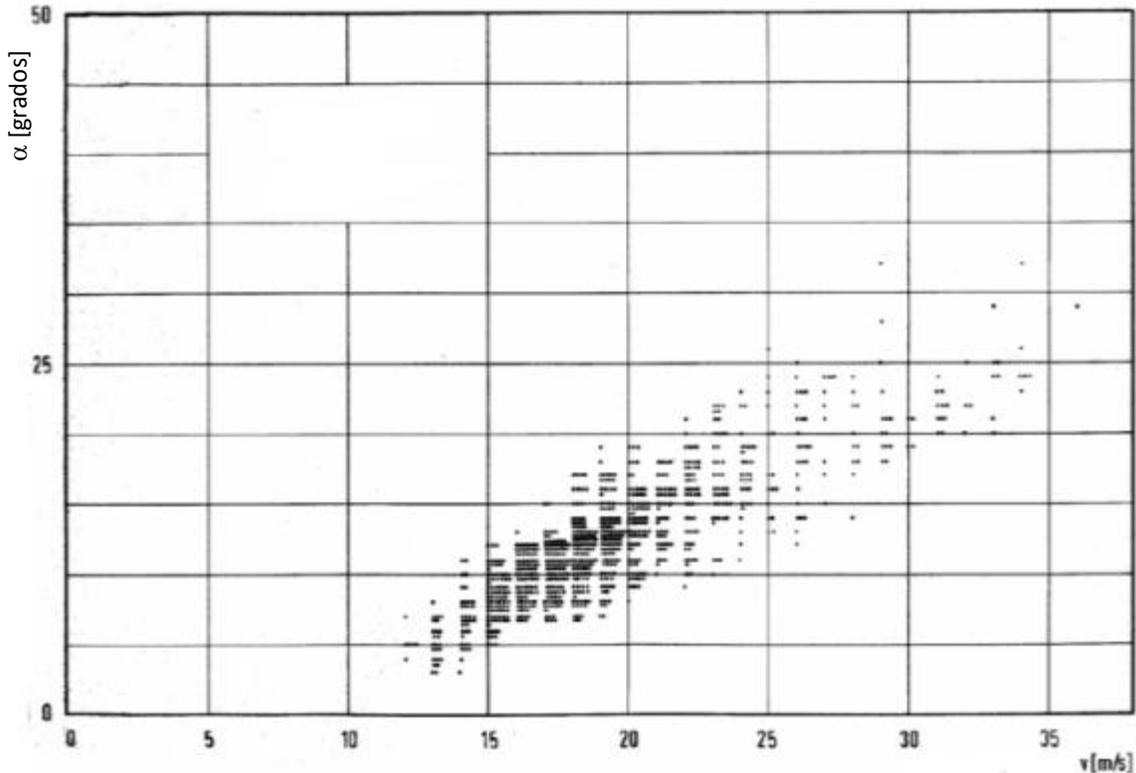


Figura 3.3. Registro de ángulos de balanceo [°] respecto a velocidad del viento [m/s] para 4 conductores ACSR 240/40 sin hielo [CIGRE 348, 2008].

Respecto a las mediciones del ángulo de balanceo realizadas en Canadá [Houle, 2000] se tienen relaciones entre éstos y los valores calculados con la expresión (3.3), considerando velocidades de viento de 5 minutos promedio. En la Figura 3.4 se considera un haz de cuatro conductores y un claro de 320 metros, donde la correspondencia entre los valores calculados y los

medidos es muy similar. Se observa una tendencia en la que los valores calculados son mayores a los medidos.

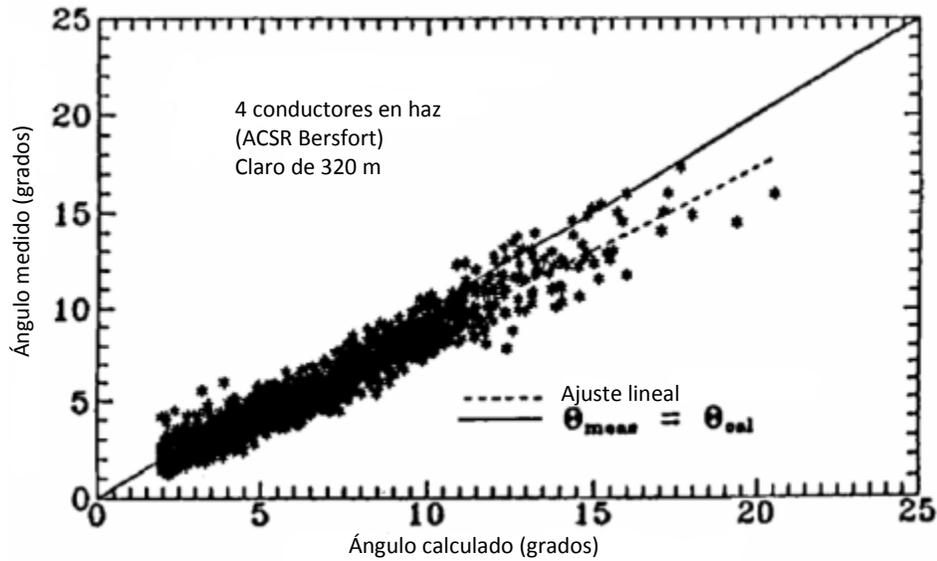


Figura 3.4. Ángulos de balanceo medidos contra calculados en Canadá [CIGRE 348, 2008].

Con base en los resultados experimentales obtenidos, el Electric Power Research Institute [EPRI, 1982] propuso la determinación del ángulo de balanceo acorde a un diagrama que considera la relación entre la velocidad del viento y un parámetro k_W definido mediante (Ver Figura 3.5),

$$k_W = \frac{d}{m_C} \cdot \frac{L_W}{L_C} \quad (3.4)$$

donde,

d = diámetro del conductor [mm].

L_W = claro de viento [m].

L_C = claro de peso [m].

m_C = masa lineal del conductor [kg/m].

Un factor importante a diferenciar es el ángulo máximo de balanceo con respecto al ángulo máximo de balanceo “promedio”. El primero resulta importante en la determinación de cargas máximas transversales en las estructuras, mientras que el segundo puede aplicarse de forma razonable para especificar los ángulos de balanceo de cadenas de aisladores con la finalidad de no sobredimensionar las estructuras.

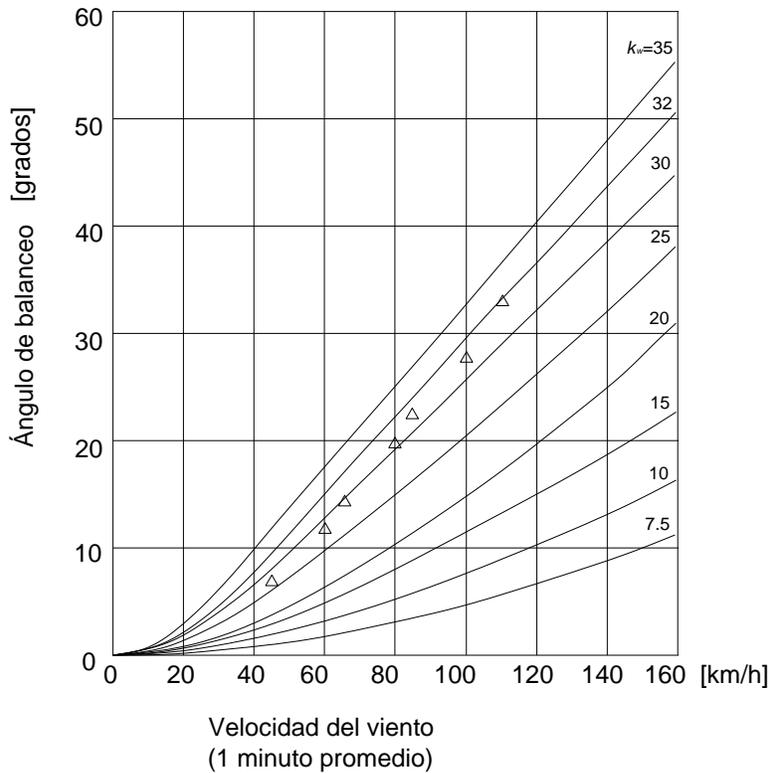


Figura 3.5. Determinación del ángulo de balanceo en aisladores para valores de k_w basados en mediciones [EPRI, 1987]. Para una velocidad del viento de 120 km/h y un parámetro de $k_w=20$ el ángulo de balanceo del aislador es 20° [CIGRE 348, 2008].

La determinación del ángulo de balanceo promedio de un aislador para determinada acción del viento puede llevarse a cabo de forma confiable mediante la expresión (3.4) considerando velocidades promedio de viento entre 5 y 10 minutos, siendo las de 5 minutos las que proveen valores conservadores.

De forma global se tiene que las condiciones de análisis para la determinación del ángulo de balanceo, y consecuentemente la geometría superior de la estructura, acorde al documento CIGRE 348[2008], se encuentran definidas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Coordinación de posición de conductores y cadena de aisladores respecto a esfuerzos eléctricos [CIGRE 348, 2008].

Esfuerzo eléctrico del aire	Probabilidad	Posición de conductor y cadena de aisladores	
		Sin viento o viento moderado durante el 99% del tiempo	Velocidad de viento alta con $T = 50$
		Alta	Baja
Voltaje a la frecuencia nominal	Alta	Cubierta por casos 1 y 2	Caso 1
Voltaje por impulso de descarga o maniobra	Baja	Caso 2	No considerado

3.2.2.1. Libramientos

En relación a los libramientos necesarios de fase a tierra se establece en los estándares IEC 60071-1[1993]e IEC 60071-2 [1996] que los voltajes mayores de los equipos se encuentran divididos en dos rangos. El rango 1 abarca desde 1kV hasta los 245kV, mientras que el rango 2 es para voltajes mayores de 245kV. Dentro del rango 1, las descargas atmosféricas definen los niveles de aislamiento mientras que para el rango 2 son definidos mediante las sobretensiones por maniobra. La Tabla 3.2 muestra algunos niveles de tensión y sus libramientos acorde a los frentes de onda definidos para una probabilidad de 90% de soporte con coeficientes de variación de 3% para descargas atmosféricas y 6% para maniobras.

Tabla 3.2. Coordinación de impulsos de voltaje y libramientos [CIGRE 348, 2008].

Nivel de tensión		Impulso de voltaje			IEC 60071-2	CIGRE Reporte 72	
U_R	U_S	$U_{90\%_{ff}}$	$U_{50\%_{ff}}$	$U_{max_{sf}}$	D_{pe}	D_{pe}	D_{pp}
kV	kV	kV	kV	kV	m	m	m
110	123	450	490	-	0,9	0,94	0,96
		550	590	-	1,1	1,13	1,17
230	245	850	920	-	1,7	1,76	1,83
		950	1030	-	1,9	1,97	2,05
		1050	1140	-	2,4	2,18	2,26
400	420	1175	1270	850	2,4	2,40	2,70
		1300	1410	950	2,9	2,80	3,20
		1425	1540	1050	3,4	3,25	3,73

donde,

U_R = voltaje nominal [kV].

U_S = voltaje máximo del sistema [kV].

U_{ff} = voltaje resistido por frente de onda rápido (descarga) [kV].

U_{max-sf} = voltaje resistido por frente de onda lento (maniobra) [kV].

D_{pe} = distancia mínima fase a fase [m].

D_{pp} = distancia mínima fase a tierra [m].

Las condiciones consideradas en la Tabla 3.2 son: temperatura de 20°C, presión del aire de 1013 mbar y humedad de 11 g/m³ para altitudes de hasta 1000 msnm.

Bajo la condición de balanceo de la cadena de aislamiento, los libramientos deben soportar los voltajes a la frecuencia nominal del sistema. Dado que esta condición no es

considerada por IEC 60071-2[1996], una opción para determinar el libramiento es lo establecido en el trabajo de CIGRE 72 [1992], donde se establecen las siguientes expresiones:

$$D_{pe.pf} = \left[\frac{U_S}{350 \cdot k_\alpha \cdot k_a \cdot k_{g.pf}} \right]^N \quad (3.5)$$

donde,

$D_{pe.pf}$ = Libramiento fase a tierra para voltaje a la frecuencia del sistema [m].

U_S = voltaje máximo del sistema [kV].

$k_\alpha = 0,88$.

$k_a = \frac{1}{\exp[(H/8150)^m]}$ = factor que considera la altitud H .

m = entre 0,7 y 1,0 acorde a [CIGRE 72, 1992].

$k_{g.pf}$ = factor de espaciamiento dependiente de la geometría de los electrodos (1,25 para conductor-plano; 1,40 para conductor-techo; 1,65 para conductor-conductor).

$N = 1$ para $U_S \leq 400$ [kV].

$N = 1,67$ para $U_S \geq 400$ [kV].

$$D_{pp.pf} = \left[\frac{\sqrt{3} \cdot U_S}{350 \cdot k_\alpha \cdot k_a \cdot k_{g.pf}} \right]^N \quad (3.6)$$

donde,

$D_{pp.pf}$ = Libramiento fase a fase para voltaje a la frecuencia del sistema [m].

$k_{g.pf}$ = factor de espaciamiento (1,65 para conductor-conductor).

Los libramientos considerados para el voltaje a la frecuencia del sistema se observan en la Tabla 3.3. La combinación de ángulo máximo de balanceo, junto con los libramientos de la Tabla 3.3, define la geometría superior de la estructura de transmisión.

Tabla 3.3. Libramientos para el nivel de voltaje a la frecuencia del sistema [CIGRE 348, 2008].

Nivel de voltaje		CIGRE 72		EN 50341-1	
U_R	U_S	$D_{pe.pf}$	$D_{pp.pf}$	$D_{pe.pf}$	$D_{pp.pf}$
kV	kV	m	m	M	M
110	123	0,32	0,42	0,23	0,37
230	245	0,64	0,85	0,43	0,69
400	420	1,16	1,52	0,70	1,17

4.3. Comisión Federal de Electricidad

La especificación CPTT-DDLT-001/02 [CFE, 2009] establece dentro de la sección 5.2.1(Localización de Estructuras) siete hipótesis de carga a considerar en conductores y cables de guarda para el diseño mecánico de los cables. Consecuentemente, las cadenas de aisladores también se ven afectadas por dichas hipótesis de carga.

Las hipótesis de carga H3 “viento máximo” y H6 “Balanceo de cables” son parecidas a las descritas previamente en el documento CIGRE 348[2008], por lo cual son viables para la determinación de las condiciones climatológicas necesarias para el cálculo del ángulo de balanceo en cadenas de aisladores. La presión del viento definida para la hipótesis de carga H6 es de 285 Pa para zonas expuestas y rurales ó de 187 Pa para zonas urbanas y protegidas. Al observar estos valores se presenta una similitud respecto a los valores establecidos en la norma NOM-001-SEDE-2005[2006], pero que considera unidades de kg/m^2 en lugar de Pa. En el caso de la hipótesis de carga H3, la determinación de la presión del viento en cables que afecta el ángulo de balanceo en los conductores, y que consecuentemente sirve como parte de la información para su determinación, se considera lo establecido en las especificaciones “Torres para líneas de subtransmisión y transmisión” [CFE, 2006] y “Postes metálicos para líneas de transmisión y subtransmisión” [CFE, 2008], cuyo Apéndice A define las metodologías para el cálculo de presiones de viento a partir de velocidades regionales del viento en México.

4

CASOS DE ESTUDIO EN EL ANÁLISIS DEL CAMPO ELÉCTRICO EN CADENAS DE AISLADORES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

4.1. Introducción

El índice de salidas de las líneas de transmisión se encuentra definido dentro del documento de la Coordinadora de Transmisión y Transformación “Fallas en líneas de transmisión, estadísticas y eventos relevantes” [CFE, 2002], donde se observa que una de las principales causas de salida de las líneas, es la violación de las distancias de seguridad dieléctricas causadas por el desplazamiento de los conductores y las cadenas de aisladores por el viento. Por lo tanto, es importante conocer de forma más precisa el comportamiento del campo eléctrico que interactúa entre las partes a potencial de tierra y las partes conductoras en las cadenas de aisladores, con la finalidad de mejorar el dimensionamiento de las líneas de transmisión y determinar cómo afecta el fenómeno en el desempeño operativo de los aisladores.

Las bases teóricas y prácticas relacionadas a la evaluación mediante el método de los elementos finitos del campo eléctrico en cadenas de aisladores (establecidas en el Capítulo 2) y los conceptos para la determinación del ángulo de balanceo en cadenas de aisladores (definido dentro de normas y documentos descritos en el Capítulo 3), son consideradas para los casos de estudio desarrollados en este trabajo y que incluyen el análisis del comportamiento del campo eléctrico en cadenas de aisladores utilizadas en México. Se consideran diferentes escenarios asociados al desplazamiento de las cadenas, los cuales son causados por el efecto del viento.

Las líneas de transmisión en México se encuentran clasificadas para valores de tensión de 115, 230 y 400 kV. Existen niveles de tensión adicionales cuyo uso se encuentra restringido ó congelado como por ejemplo 161 y 138 kV [NMX, 1999]. Consecuentemente, se considera para el presente trabajo, el desarrollo de casos de estudio para el análisis del campo eléctrico en cadenas de aisladores para líneas de transmisión en niveles de tensión de 115, 230 y 400 kV.

Las estructuras comúnmente empleadas dentro de las líneas de transmisión son torres autosoportadas y postes troncocónicos. En este trabajo de tesis se considera el uso de modelos

representativos de ambos tipos de estructuras. Las torres autosoportadas son comúnmente empleadas en proyectos rurales donde los derechos de vía no son tan restrictivos, mientras que los postes troncocónicos se aplican principalmente en zonas urbanas donde se dispone de poco espacio para la ubicación de los conductores y presentan un menor impacto estético para el ambiente.

Las zonas rurales ó con terrenos abiertos presentan velocidades de viento mayores, que causan desplazamientos grandes de conductores y cadenas de aisladores, por lo que se requieren dimensiones mayores en las estructuras para garantizar que las distancias dieléctricas sean apropiadas. Por otro lado, en las zonas urbanas debido a la cantidad de obstáculos que se encuentran en el terreno se presenta una velocidad de viento menor y mayor turbulencia, resultando en dimensiones menores de los postes troncocónicos.

La clasificación por zonas acorde a la rugosidad de terreno en las especificaciones J1000-50 [CFE, 2006] y J6100-54 [CFE, 2008] de la CFE, sirven de base para la determinación de las velocidades de viento y consecuentemente de las presiones que afectarán el ángulo de balanceo en las cadenas de aisladores y por lo tanto en su dimensionamiento con respecto a la estructura.

4.2. Casos de estudio

Para todos los casos de estudio del presente trabajo se consideran estructuras tipo suspensión ya que son susceptibles de exhibir un mayor cambio en su ángulo de balanceo debido a las presiones transversales del viento. De igual forma, los modelos establecidos se asocian a la cruceta o brazo medio de las estructuras con la finalidad de observar y analizar la interacción del campo eléctrico y el potencial entre las estructuras y las cadenas de aisladores.

Los ángulos de balanceo considerados para todos los casos de estudio son 0° , 15° y 30° con la finalidad de observar los cambios en los esfuerzos eléctricos en las cadenas de aisladores con respecto a la modificación en su distancia al cuerpo de las estructuras ocasionado por la acción del viento. El valor máximo de ángulo de balanceo considerado es de 30° ya que está establecido en la NOM-001-SEDE-2005. Un valor intermedio de 15° se evalúa para observar los cambios intermedios entre las condiciones máximas (deflexión máxima) y mínimas (a plomo).

Las cadenas de aisladores de 115 y 230 kV presentan los patrones de campo eléctrico y potencial mostrados en las Figuras 4.3 a 4.36 para los casos de disposición vertical y bajo un ángulo de balanceo. Los valores obtenidos son considerando el comportamiento interno a lo largo de las cadenas. En los casos de disposición vertical se obtienen los patrones hasta alcanzar el brazo inmediato inferior de la estructura de transmisión. En el caso de la estructura de 400 kV se considera la condición de cadenas de aisladores en disposición en “V” para este trabajo.

La cadena de aisladores está compuesta de un determinado número de unidades constituidas acorde a procedimientos y criterios de los documentos descritos en la sección 2.2 de este trabajo y para los niveles de tensión considerados (115, 230 y 400 kV).

Dentro del Apéndice A se encuentra un resumen de las características de los modelos numéricos geométricos desarrollados mediante el FEM para los casos de estudio considerados en el presente trabajo en relación a: número de elementos, grados de libertad y tiempo de solución.

4.2.1 Características

Las condiciones y características eléctricas definidas para los elementos que conforman los modelos geométricos elaborados para los casos de estudio son descritas a continuación.

Las propiedades dieléctricas de cada una de las partes que integran un aislador se observan en la Tabla 4.1. En la Figura 4.1 se observa un corte de sección transversal del aislador estándar 25SVC111 de vidrio templado considerado en el presente trabajo. El perfil del modelo del aislador es definido con base en información proporcionada por el fabricante NGK [2007]. Al encontrarse enganchadas directamente las partes metálicas del aislador en una cadena de aisladores (calavera y perno), éstas conforman en el modelo desarrollado un solo elemento ya que sus propiedades dieléctricas son parecidas.

Las propiedades dieléctricas asignadas a la fuente de excitación (cable conductor) son las del material aluminio, las secciones de las estructuras de transmisión tienen asignadas las propiedades dieléctricas del acero. Finalmente, los materiales de la cadena de aisladores que presentan menor conductividad eléctrica son el vidrio templado y el cemento (ver Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Propiedades dieléctricas de elementos utilizados dentro de los casos de estudio.

Material	Permitividad relativa (ϵ_r) []	Conductividad eléctrica (σ) [S/m]	Voltaje de fuente (V_0) [kV]
Aire	1	0,0	
Acero	1	$4,032e^6$	0,0
Hierro	1	$1,12e^7$	
Aluminio	1	$3,774e^7$	66,395 (para 115 kV) 132,791 (para 230 kV) 230,940 (para 400 kV)
Vidrio	2,09	$1e^{-14}$	
Cemento	12,1	$1e^{-12}$	

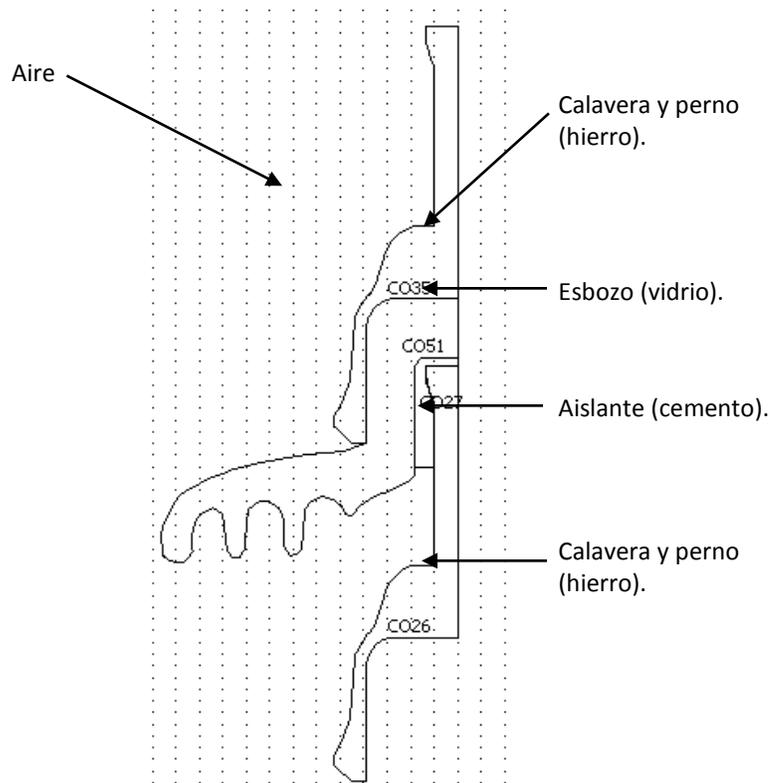


Figura 4.1. Sección transversal de aislador definida dentro de los casos de estudio.

4.3. Descripción geométrica de las líneas de transmisión de 115 kV

La cadena de aisladores en suspensión bajo estudio está conformada de 10 aisladores estándar tipo 25SVC111C (longitud de 1,4 metros), la altitud considerada para la determinación de la longitud de la cadena es de 2000 msnm y el nivel de contaminación es de 20 mm/kV_{ff} (media).

Las estructuras normalizadas de la CFE consideradas para especificar las dimensiones del modelo son (Figura 4.2):

- Poste troncocónico 1210SMP, tipo suspensión de 2 circuitos.
- Torre autosoportada E71A21, tipo suspensión de 2 circuitos.

El calibre del cable conductor en este nivel de tensión es 795 kCM (28,11 mm de diámetro exterior) con un conductor por fase.

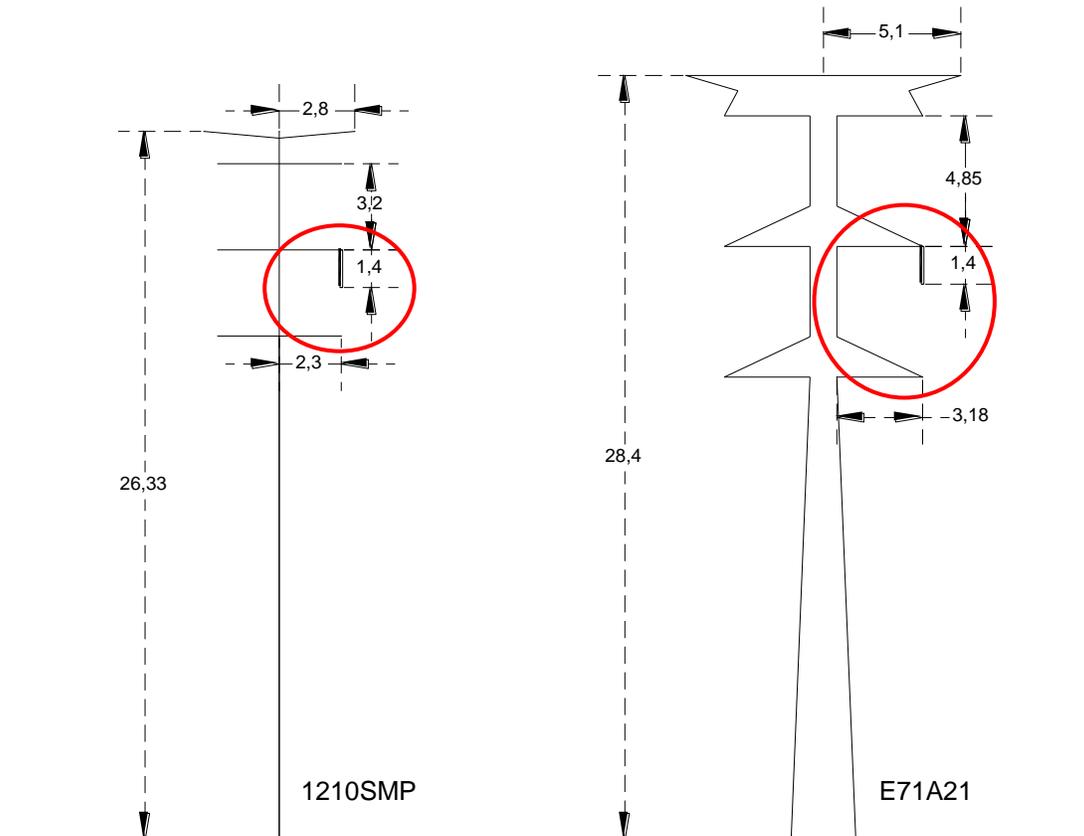


Figura 4.2. Dimensiones generales de estructuras de 115 kV de la CFE.

El modelo geométrico para el análisis del campo eléctrico y distribución de potencial en cadenas de aisladores para estructuras de 115 kV considera una fuente de excitación (cable conductor de aluminio), la cadena de aisladores conformada con distintos elementos continuos (cemento, esbozos, herrajes) de determinadas propiedades dieléctricas y una sección de las estructuras conformada por la cruceta ó brazo medio y la inmediata inferior, así como parte del cuerpo recto. Todos estos elementos se encuentran inmersos dentro de una frontera de dimensiones cúbicas. Para ambos casos de estudio (115 kV) las dimensiones externas son 6 por 6 metros.

El nivel de voltaje ó potencial eléctrico escalar de la fuente de excitación (cable conductor), respecto a tierra, establecido en el modelo es de 66,395 kV. Un nivel de potencial 0,0kV se considera para toda la sección de las estructuras establecidas.

4.3.1. Campo eléctrico y distribución de potencial en cadena de aisladores en disposición vertical para 115 kV

Los modelos tridimensionales desarrollados para análisis por el método de los elementos finitos del poste 1210SMP y la torre E71A21 se observan en las Figuras 4.3 a 4.18. Como parte de los modelos desarrollados se establece una sección de conductor 795 kCM de 2 metros de longitud. El modelo considerado para la cadena de aisladores está constituido de secciones continuas de unidades de aisladores, cada una de las cuales se encuentra conformada por su pin o perno, cemento, esbozo de vidrio templado y calavera acorde a lo observado en la Figura 4.1 y considerando las propiedades de la Tabla 4.1.

La Figura 4.3 muestra el modelo tridimensional desarrollado para la cadena de aisladores de 115 kV junto con una sección del poste 1210SMP, así como la distribución del potencial a lo largo de la misma. Se presenta el mayor valor de potencial (66,395 kV) en la zona de ubicación del conductor y decrece su valor conforme se aproxima a la sección de potencial nulo (0,0 kV) establecido en la estructura.

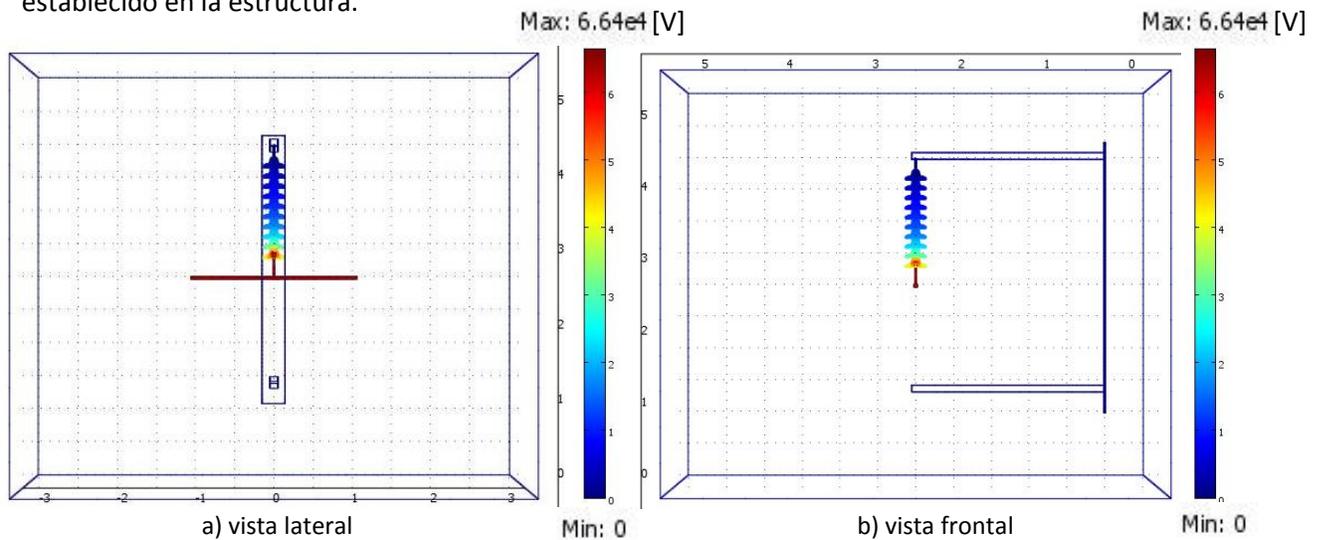


Figura 4.3. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV con disposición vertical en poste 1210SMP.

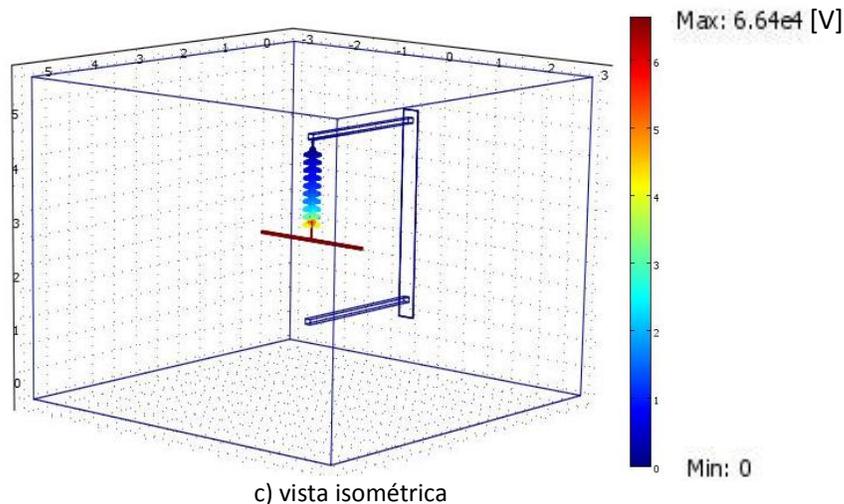


Figura 4.3. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV con disposición vertical en poste 1210SMP. *Continuación.*

La distribución del potencial presente en los primeros cuatro aisladores de la cadena partiendo de la fuente de excitación se ve reducida a lo largo de los mismos hasta un valor de 20,0 kV aproximadamente (ver Figura 4.4). Los subsecuentes seis aisladores de la cadena presentan una razón de cambio de potencial más pequeña y sus esfuerzos eléctricos son más homogéneos y menores, lo cual verifica el comportamiento eléctrico no lineal de la cadena completa. Acorde a la Figura 4.3 se puede señalar que, con respecto a su longitud, el 40% de la cadena (los cuatro primeros aisladores) soporta aproximadamente un 70% del esfuerzo eléctrico mientras que el otro 60% de la cadena (los seis últimos aisladores) soporta un 30% del esfuerzo eléctrico aproximadamente.

La Figura 4.4 muestra el comportamiento mediante el cual se distribuye el potencial a lo largo de la cadena de aisladores y a través del aire desde el brazo inmediato inferior hasta el brazo medio de la estructura pasando por la fuente de excitación (cable conductor). Se observa en la Figura 4.4 que la distribución del potencial presenta un punto máximo en 66,395 kV para una distancia aproximada de 35 centímetros, donde se encuentra posicionado el cable conductor y sus accesorios. La parte derecha de la Figura 4.4, respecto al valor máximo, indica el comportamiento del potencial eléctrico a lo largo de la cadena de aisladores donde se ve reflejada la interacción de las partes constitutivas de cada aislador (cemento, vidrio, hierro) con pequeñas protuberancias en la curva. La parte izquierda de la figura, respecto al valor máximo, representa el comportamiento del potencial eléctrico en el aire, el cual es no lineal pero sin las pequeñas variaciones observables en el lado derecho de la gráfica ya que el medio es homogéneo.

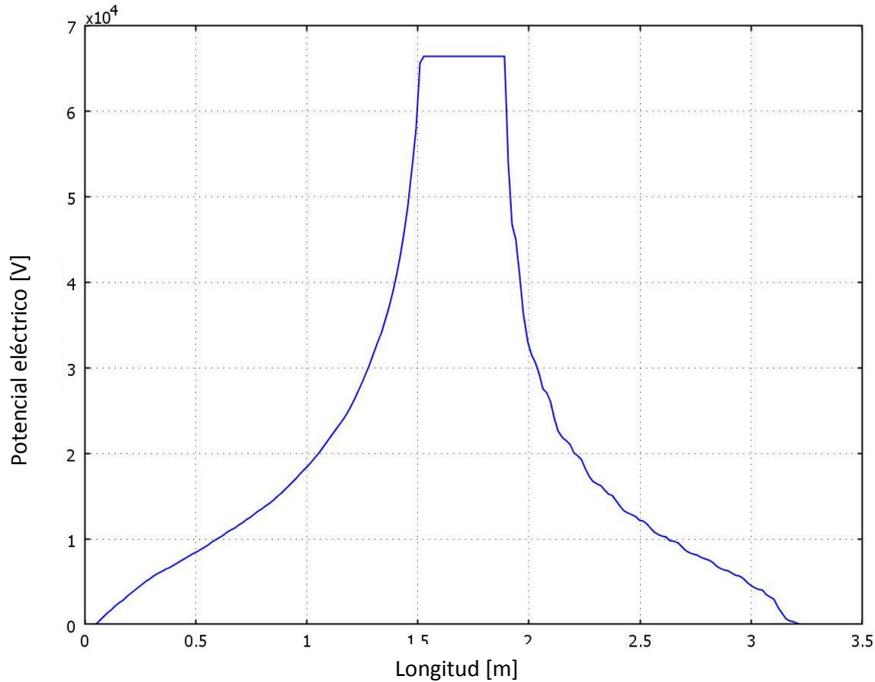


Figura 4.4. Distribución de potencial a lo largo de cadena de aisladores de 115 kV en disposición vertical para poste 1210SMP (distancia brazo medio a brazo inferior de la estructura).

La Figura 4.5 muestra el comportamiento del campo eléctrico a lo largo de la cadena y en el entorno de la estructura 1210SMP. Se observan las líneas de flujo del campo eléctrico desde tres perspectivas diferentes, donde el campo eléctrico presenta una mayor intensidad a lo largo de la cadena que con respecto a la estructura a causa de una mayor conductividad eléctrica. El campo eléctrico se origina en el conductor como la fuente de excitación del modelo. El valor máximo del campo eléctrico que se observa en la Figura 4.5 es de 1034,0 kV/m (cerca del perno ó pin del primer aislador de la cadena) mientras que el valor mínimo es de 0,0151 V/m (cerca de la estructura).

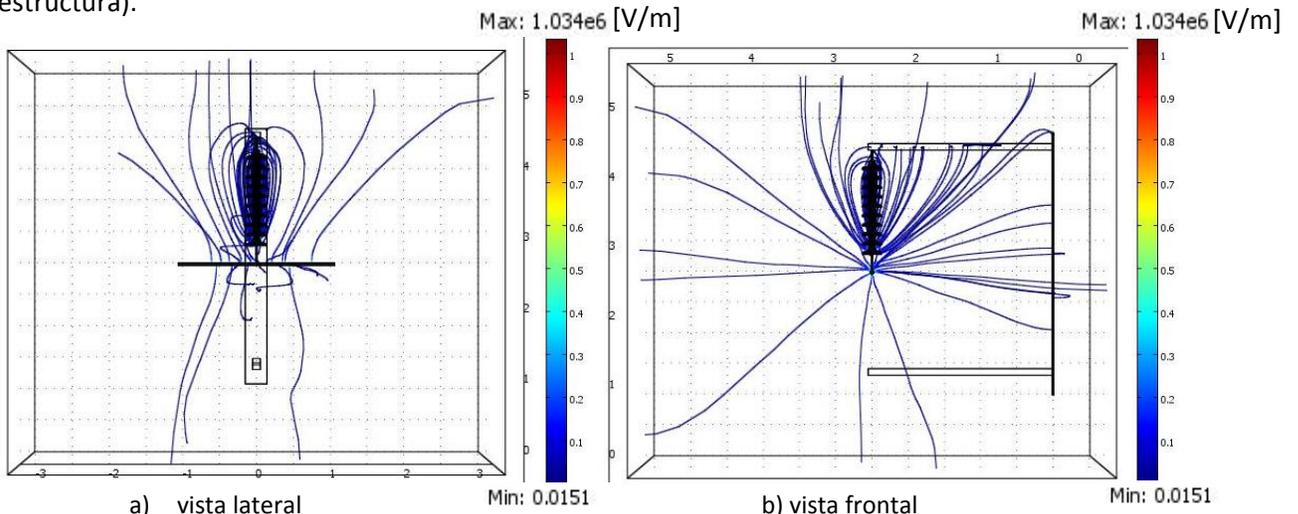


Figura 4.5. Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV con disposición vertical en poste 1210SMP.

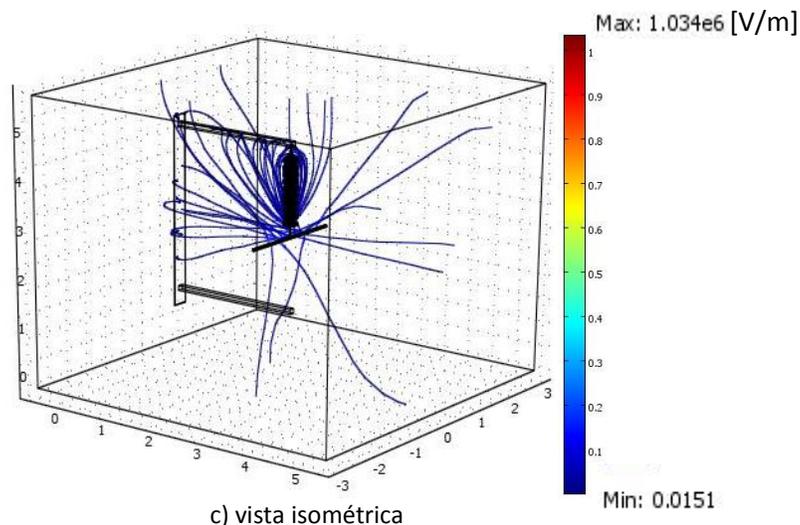


Figura 4.5. Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV con disposición vertical en poste 1210SMP. *Continuación.*

La Figura 4.6 ilustra el comportamiento del campo eléctrico a lo largo de la cadena de aisladores, en una parte del aire y hasta el brazo inferior de la cadena donde su valor es despreciable. El mayor esfuerzo del campo eléctrico a lo largo de la cadena de aisladores acorde a la Figura 4.6 es de aproximadamente 700,0 kV/m. Éste se presenta en la zona del cemento y esbozo de vidrio templado entre la calavera del primer aislador de la cadena y su perno (ver Figura 4.7).

Respecto al campo eléctrico en el aire, la Figura 4.6 muestra que la intensidad mayor del campo eléctrico es de aproximadamente 480,0 kV/m. Se observa en la Figura 4.6 que la parte izquierda de la gráfica no presenta las variaciones del campo eléctrico que se encuentran en la parte derecha, debido a que es un medio con propiedades dieléctricas homogéneas (aire). Los cambios de las propiedades dieléctricas de los elementos constitutivos de los aisladores causan la variación en el campo eléctrico que se observa en la parte derecha de la Figura 4.6, al pasar de un elemento a otro. Los valores pico en la Figura 4.6 corresponden al interior de secciones metálicas (hierro) de la cadena mientras que los valores mínimos y en decremento corresponden a las partes dieléctricas de menor conductividad eléctrica (vidrio templado y cemento).

Mediante las Figuras 4.4 y 4.6 es posible observar los comportamientos de la distribución de potencial y campo eléctrico de forma clara para una trayectoria lineal interna determinada. Sin embargo, la Figura 4.7 ayuda a observar de cerca detalles relevantes en la trayectoria de los fenómenos descritos entre las diferentes fronteras de los elementos.

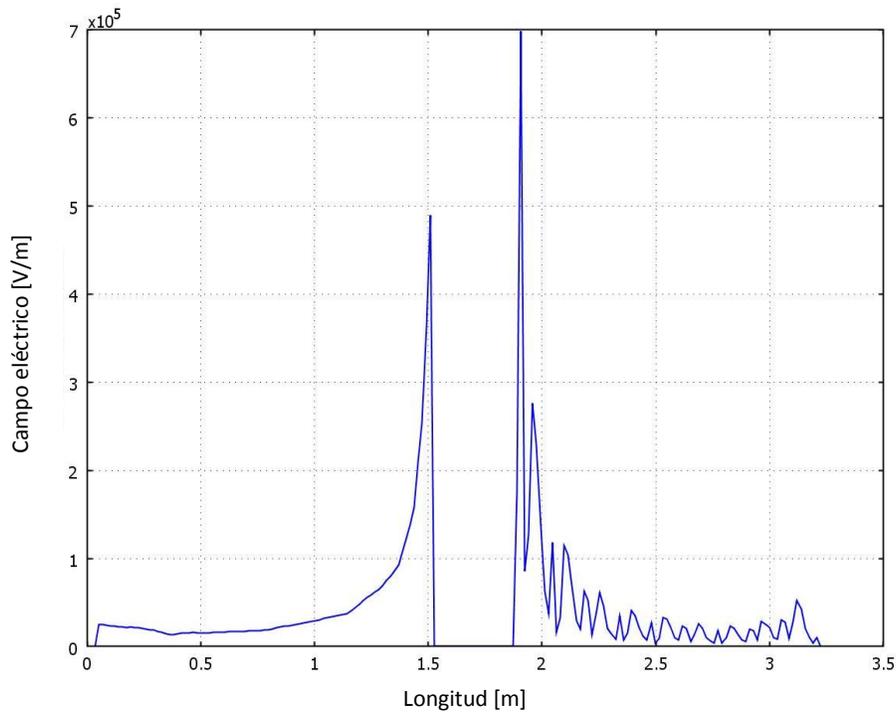


Figura 4.6. Campo eléctrico a lo largo de cadena de aisladores de 115 kV en disposición vertical para poste 1210SMP (distancia brazo medio a brazo inferior de la estructura).

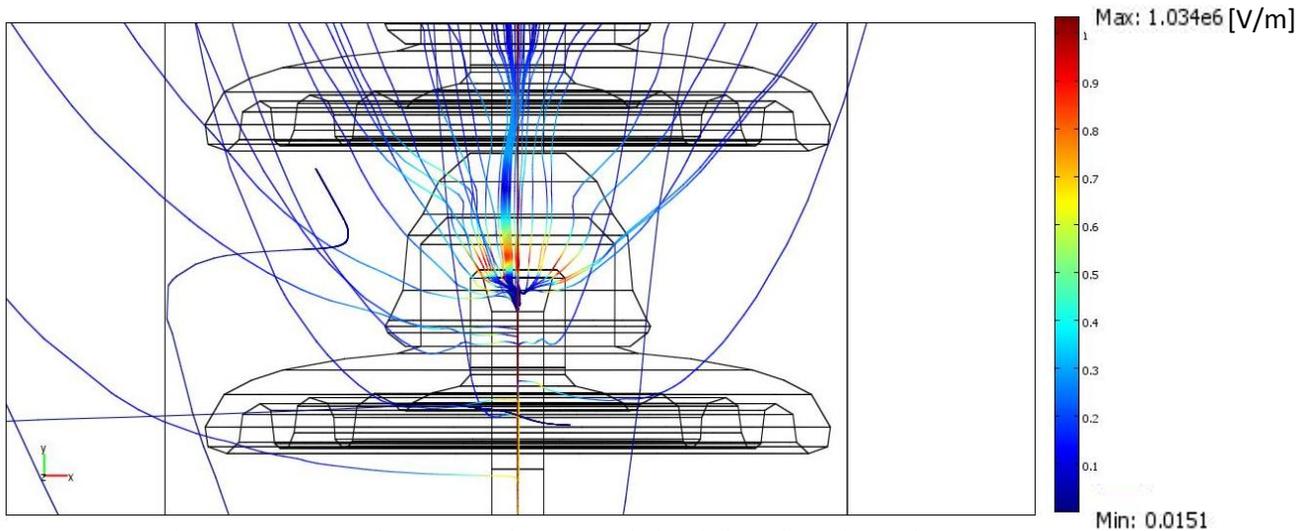


Figura 4.7. Campo eléctrico en el primer aislador de la cadena de 115 kV.

La Figura 4.8 muestra el modelo geométrico desarrollado de la cadena de aisladores y una sección de la estructura E71A21 observándose la distribución del potencial a lo largo de la cadena. El mayor valor del potencial se presenta en la zona del conductor (66,395 kV) y decrece su valor conforme se aproxima a la sección de cero potencial en la estructura.

Acorde a la Figura 4.8, los valores más grandes de potencial se encuentran en los primeros cuatro aisladores de la cadena y presentan un cambio más pequeño en el resto de los aisladores

de la cadena, observándose un comportamiento similar del potencial al del modelo realizado para la cadena de aisladores de la estructura tipo poste 1210SMP.

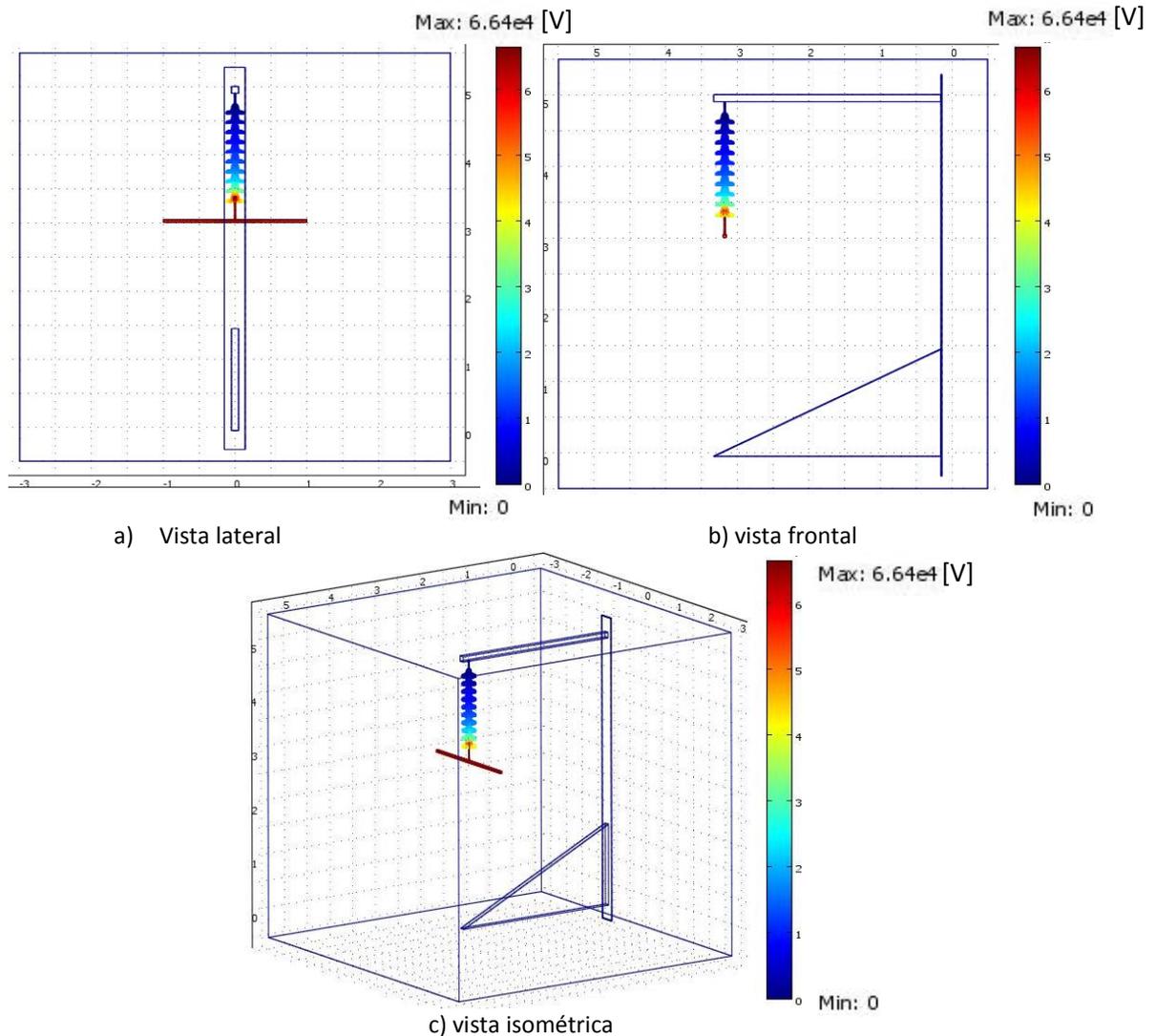


Figura 4.8. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV con disposición vertical en torre E71A21.

La distribución del potencial a lo largo de la cadena de aisladores y en el aire, considerando la torre E71A21, se observa en la Figura 4.9. Un incremento en la distancia entre la cruzeta inferior y la cruzeta media de la torre E71A21 (4,85 metros) con respecto a la distancia presente en el modelo geométrico del poste 1210SMP (3,2 metros) se ve reflejado en la distribución del potencial de la Figura 4.9. El potencial máximo de la Figura 4.9 es 66,395 kV en el conductor y sus accesorios directamente enganchados. La parte izquierda de la Figura 4.9 muestra la distribución de potencial en el aire partiendo de un valor de 0,0 kV donde está localizado el extremo final de la cruzeta inferior de la torre E71A21. En la parte derecha de la Figura 4.9 se

observan las protuberancias de la curva de potencial eléctrico causadas por la presencia de los aisladores y las diferentes propiedades dieléctricas de los elementos que los conforman.

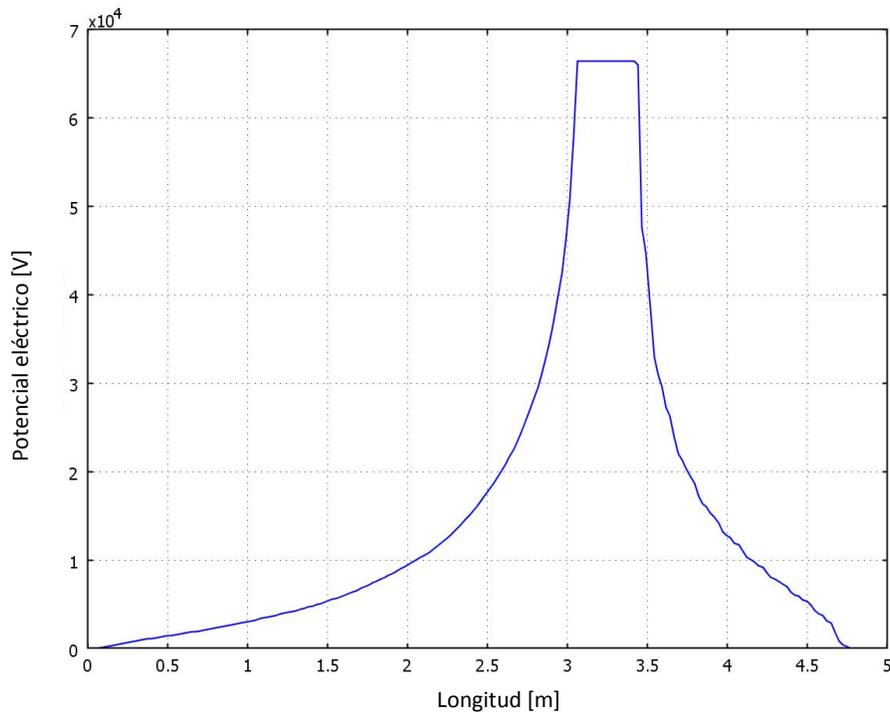


Figura 4.9. Distribución de potencial a lo largo de cadena de aisladores de 115 kV en disposición vertical para torre E71A21 (distancia cruceta media a cruceta inferior de la estructura).

La vista frontal de la Figura 4.10 muestra que las líneas de flujo del campo eléctrico tienen una interacción mayor respecto al cuerpo recto para la torre E71A21, comparado con la misma vista de la estructura tipo poste 1210SMP (Figura 4.5). Esto es causado por las diferencias entre la forma y las dimensiones de las crucetas y brazos de la torre E71A21 y el poste 1210SMP, respectivamente. Consecuentemente, la distribución del campo eléctrico en el aire es más homogénea, mientras se conserve constante la distancia de la fuente de excitación con respecto a las fronteras que lo rodean en todas las direcciones.

Debido a la relación presente entre el campo eléctrico y la distribución del potencial (ecuación 2.6) es viable aplicar el concepto de la eficiencia de la cadena, definido mediante la ecuación 2.1, considerando los valores del campo eléctrico interno máximo de cada uno de los aisladores que conforman la cadena, en lugar de los valores del potencial eléctrico. Mediante el apoyo de curvas de comportamiento del campo eléctrico en las cadenas como las que se observan en las Figuras 4.6 o 4.11 es relativamente fácil determinar el grado de eficiencia de una cadena de aisladores.

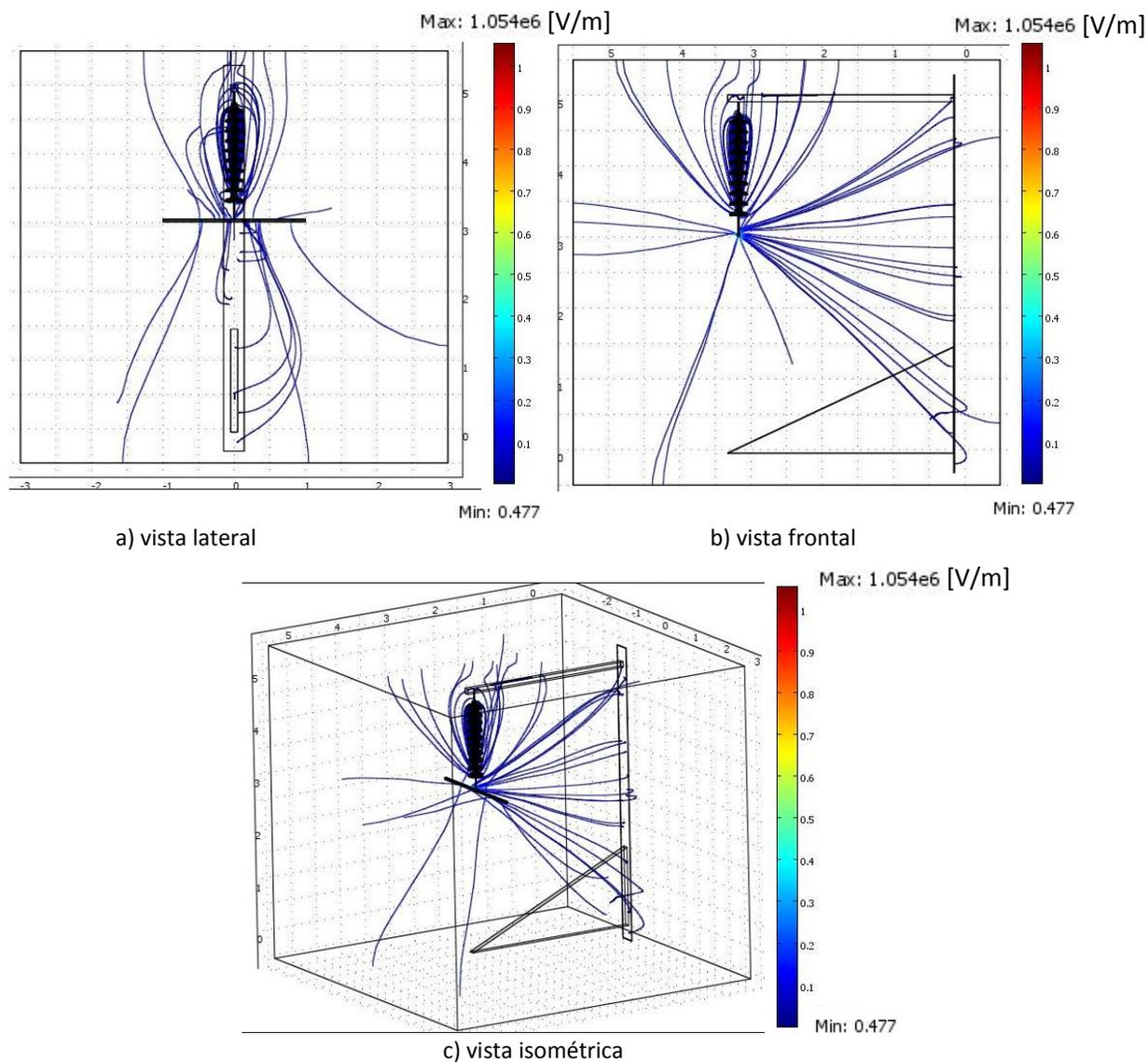


Figura 4.10. Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV con disposición vertical para torre E71A21.

La Figura 4.11 muestra el comportamiento del campo eléctrico a lo largo de la cadena de aisladores y en el aire, hasta alcanzar el extremo de la cruceta inferior de la estructura E71A21. Un campo eléctrico inexistente se presenta dentro de la fuente de excitación (cable conductor) y sus accesorios directamente enganchados. La intensidad del campo eléctrico máxima acorde a la gráfica es de aproximadamente 560,0 kV/m.

En parte izquierda de la Figura 4.11 se observa el comportamiento no lineal del campo eléctrico en el aire que disminuye asintóticamente hasta menos de 10,0 kV/m cuando la distancia con respecto a la fuente de excitación es de 1,5 metros. El lado derecho de la Figura 4.11 muestra la influencia de las diferentes propiedades dieléctricas de los elementos constitutivos de la cadena

de aisladores afectando el valor del campo eléctrico. El campo eléctrico decrece a lo largo de la cadena, pero en el último aislador se observa un incremento antes de alcanzar la estructura, en la cual el valor de campo eléctrico es despreciable.

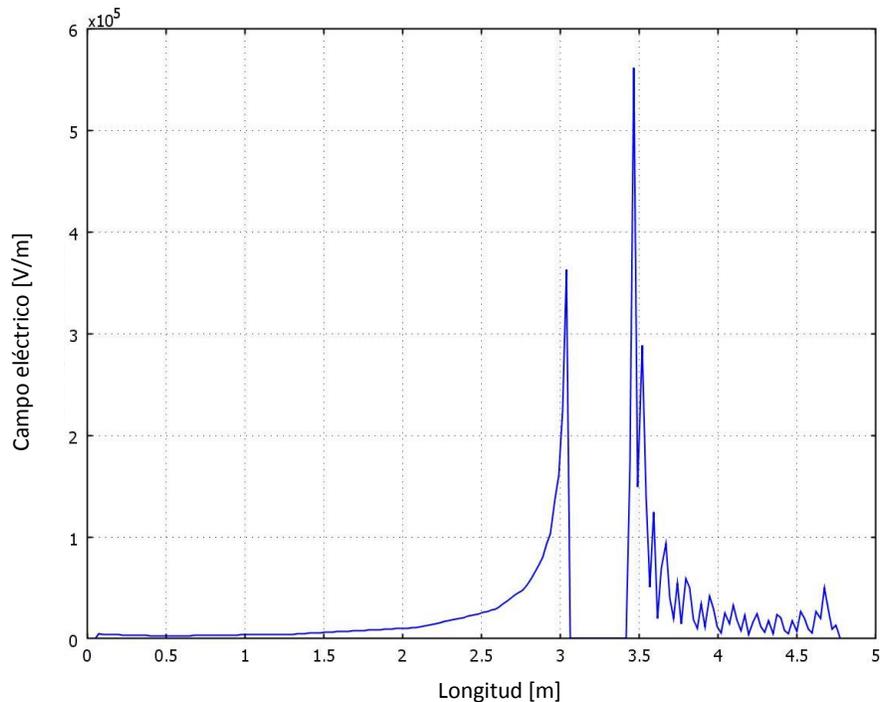


Figura 4.11. Campo eléctrico a lo largo de cadena de aisladores de 115 kV en disposición vertical para torre E71A21 (distancia cruceta media a cruceta inferior de la estructura).

4.3.2. Campo eléctrico y distribución de potencial en cadenas de aisladores con ángulo de balanceo para 115 kV

Los modelos tridimensionales desarrollados para análisis por el método de elementos finitos para el poste 1210SMP y la torre E71A21 en 115 kV, considerando un ángulo de balanceo de la cadena de aisladores se observan en las Figuras 4.12a 4.19.

La distribución de potencial en la cadena de aisladores, considerando un ángulo de balanceo, se observa desde las perspectivas frontal e isométrica en la Figura 4.12, donde el cable conductor como la fuente de excitación presenta el valor de 66,395 kV, acorde al nivel de tensión nominal fase a tierra para líneas de transmisión de 115 kV. En este caso de estudio no se observan grandes diferencias de la distribución del potencial en la cadena de aisladores con respecto al caso de estudio de la misma estructura 1210SMP bajo la condición de disposición vertical (Figura 4.3).

La mayor parte del esfuerzo eléctrico se encuentra presente en los primeros cuatro elementos de la cadena.

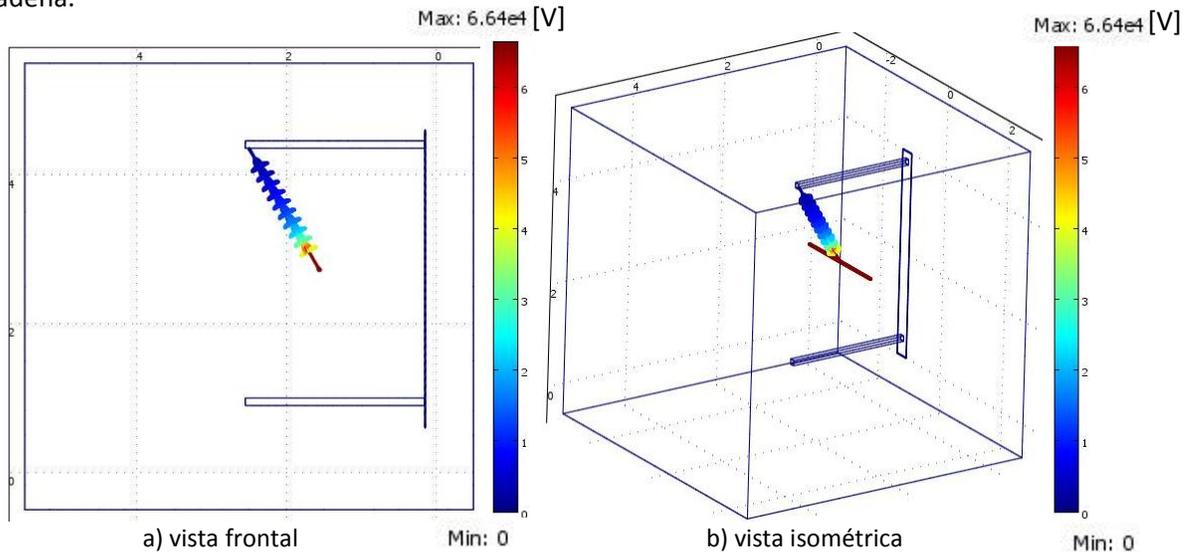


Figura 4.12. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para poste 1210SMP.

El comportamiento de la distribución de potencial a lo largo de la cadena de aisladores de la estructura 1210SMP para ángulos de balanceo de 30 y 15° se observa en Figura 4.13. Las diferencias presentes en ambos casos son mínimas visualmente. Se observa un mayor esfuerzo eléctrico dentro de los primeros cuatro aisladores de la cadena (58,4 cm), presentándose un comportamiento casi lineal para los últimos seis aisladores de la cadena (90 cm). Cuando el ángulo de balanceo es 15° el potencial en los seis aisladores finales de la cadena es mayor con respecto a un ángulo de balanceo de 30°, acorde a la Figura 4.13.

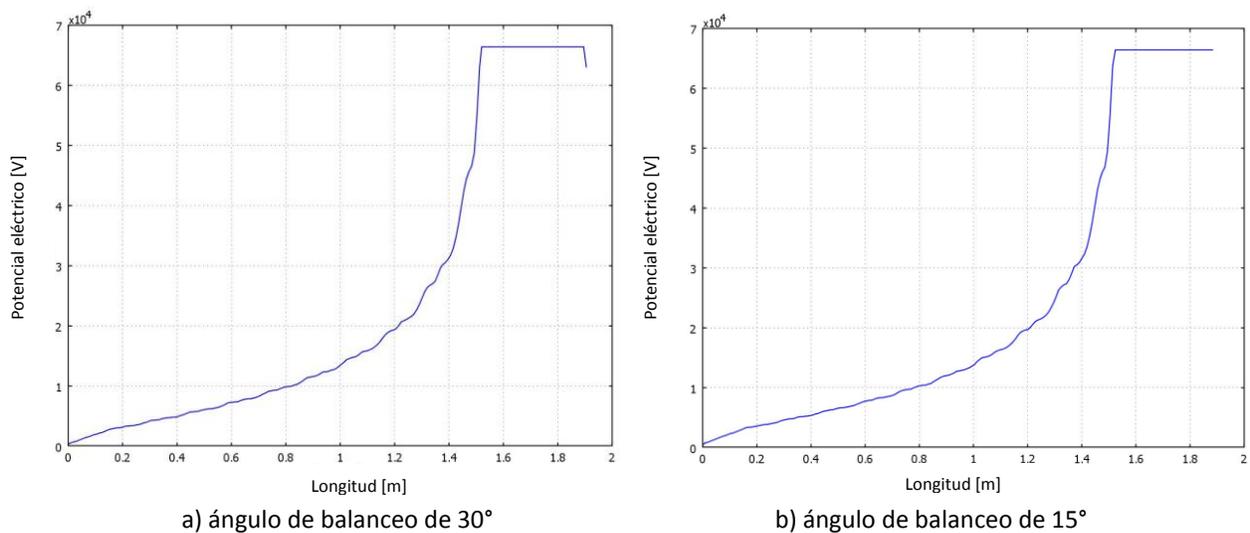


Figura 4.13. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para poste 1210SMP.

En la Figura 4.14 se observan las líneas del campo eléctrico para la cadena de aisladores con un ángulo de balanceo de 30°. En comparación con el caso de disposición vertical, la interacción de las líneas de flujo del campo eléctrico, entorno a la cadena de aisladores, con la estructura 1210SMP es mayor cuando se presenta deflexión de la cadena por viento como se puede observar en la vista frontal de las Figuras 4.5 y 4.14.

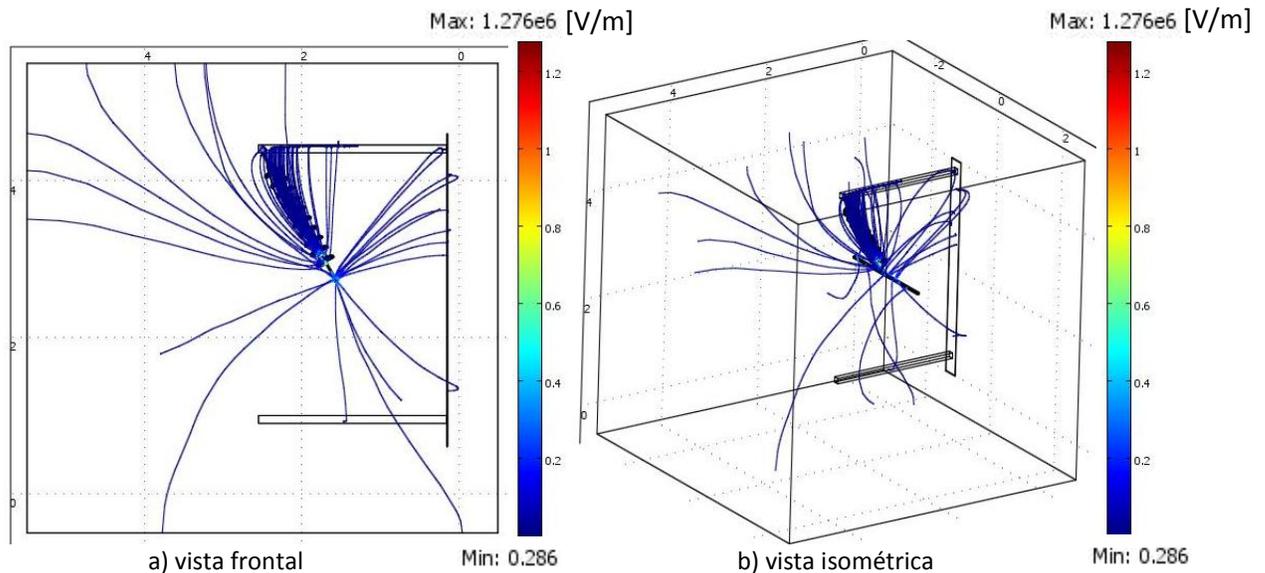


Figura 4.14. Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para poste 1210SMP.

La Figura 4.15 muestra el campo eléctrico a lo largo de la cadena de aisladores para los casos de 30 y 15° de deflexión. A diferencia del caso en el que se presenta una disposición vertical en la cadena de aisladores (Figura 4.6), se tiene que la interacción del campo eléctrico con la estructura es mayor, debido a que se acortan las distancias entre la fuente de excitación (cable conductor) y la zona de potencial cero (brazo y cuerpo recto de la estructura). Consecuentemente, los esfuerzos eléctricos máximos en la cadena se ven incrementados pasando de un valor de 700,0 kV/m en disposición vertical a valores de 970,0 y 960,0 kV/m para deflexiones de 15 y 30° respectivamente.

La Figura 4.15 no muestra para los casos de ángulo de balanceo de 30 y 15° la parte del comportamiento del campo eléctrico en el aire a diferencia de las Figuras 4.6 y 4.11 previas debido a que el trabajo se encuentra enfocado en el comportamiento interno de la cadena de aisladores. La conformación de superficies ó curvas de nivel para la distribución del potencial y el campo eléctrico representan otras formas útiles de visualización del comportamiento de variables eléctricas.

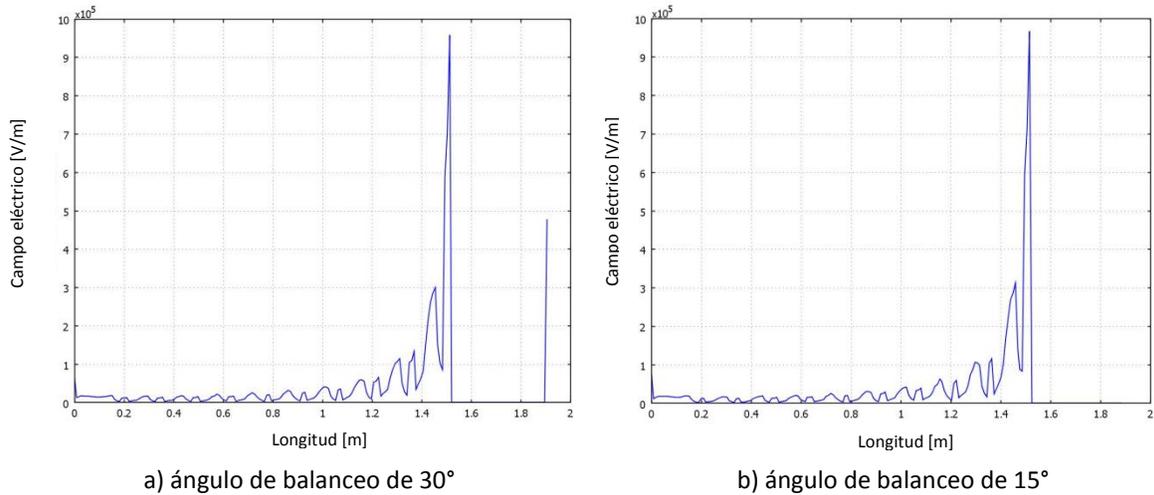


Figura 4.15. Campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para poste 1210SMP.

La Figura 4.16 indica la distribución de potencial en la cadena de aisladores para la torre E71A21. La fuente de excitación, representada por el cable conductor, muestra un valor de potencial eléctrico de 66,395 kV. Como en los casos previos, gran parte del esfuerzo se encuentra distribuido en los primeros cuatro aisladores de la cadena.

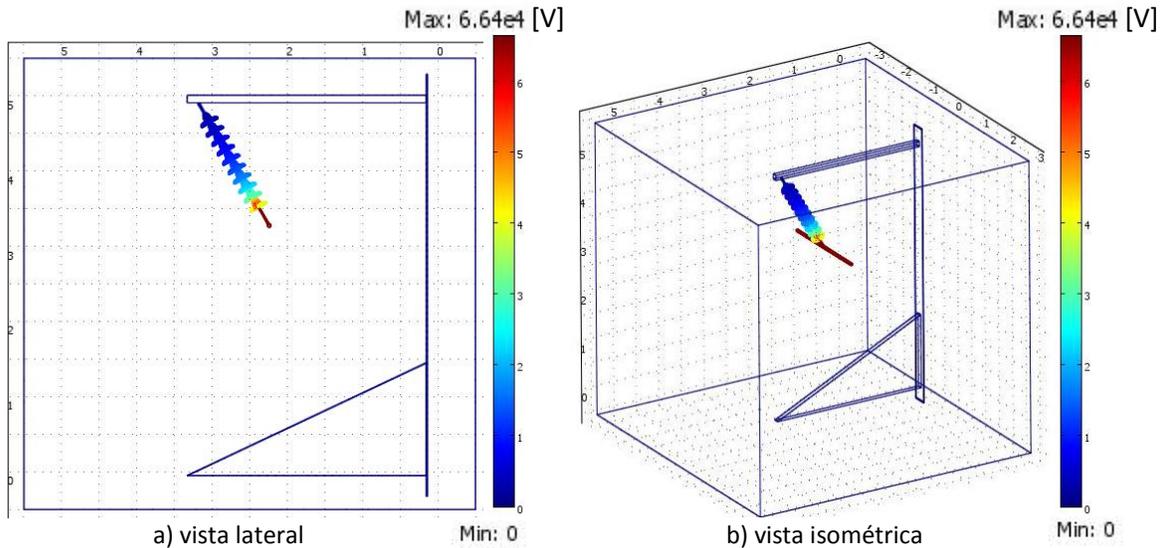


Figura 4.16. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para torre E71A21.

La Figura 4.17 muestra la distribución de potencial a lo largo de la cadena de aisladores en la estructura E71A21 considerando deflexión por viento. Se observa de forma similar al caso de estudio del poste 1210SMP (Figura 4.13) que presenta una mejor distribución del potencial para el caso de ángulo de balanceo de 15° respecto al de 30° [Izgi, 2008]. Por consiguiente, la eficiencia de la cadena es mejor en el caso de ángulo de balanceo de 15° que en el de 30°.

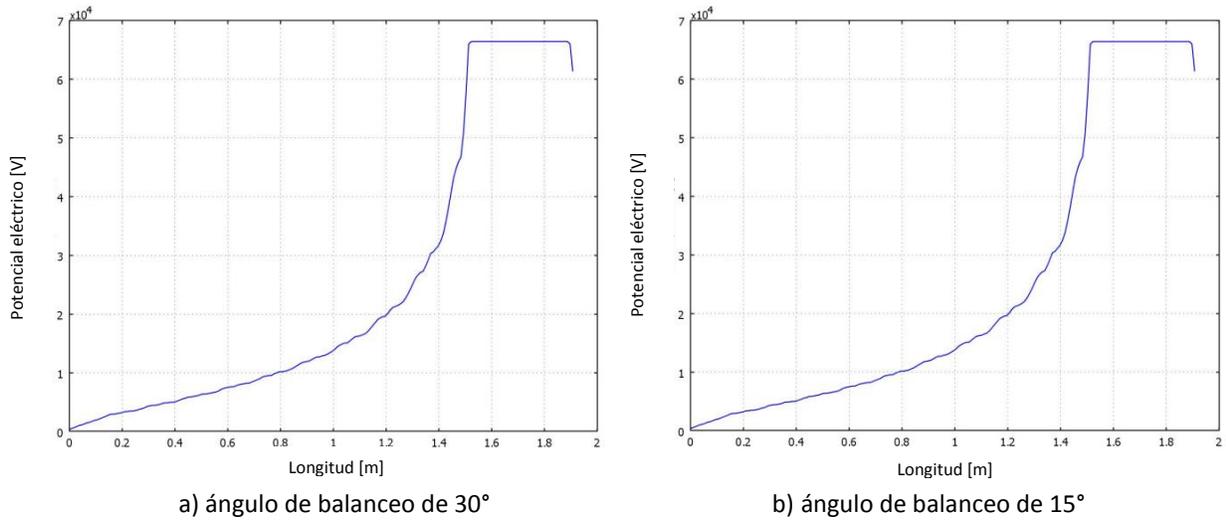


Figura 4.17. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para torre E71A21.

La Figura 4.18 presenta el comportamiento de las líneas de campo eléctrico considerando un ángulo de balanceo de 30°. En este caso se observa una interacción mayor de las líneas de flujo con la estructura que para el caso de disposición vertical de la cadena, comparando las vistas frontales de las Figuras 4.10 y 4.18. Lo anterior es el resultado esperado debido a una menor distancia presente entre la estructura y la fuente de excitación (cable conductor).

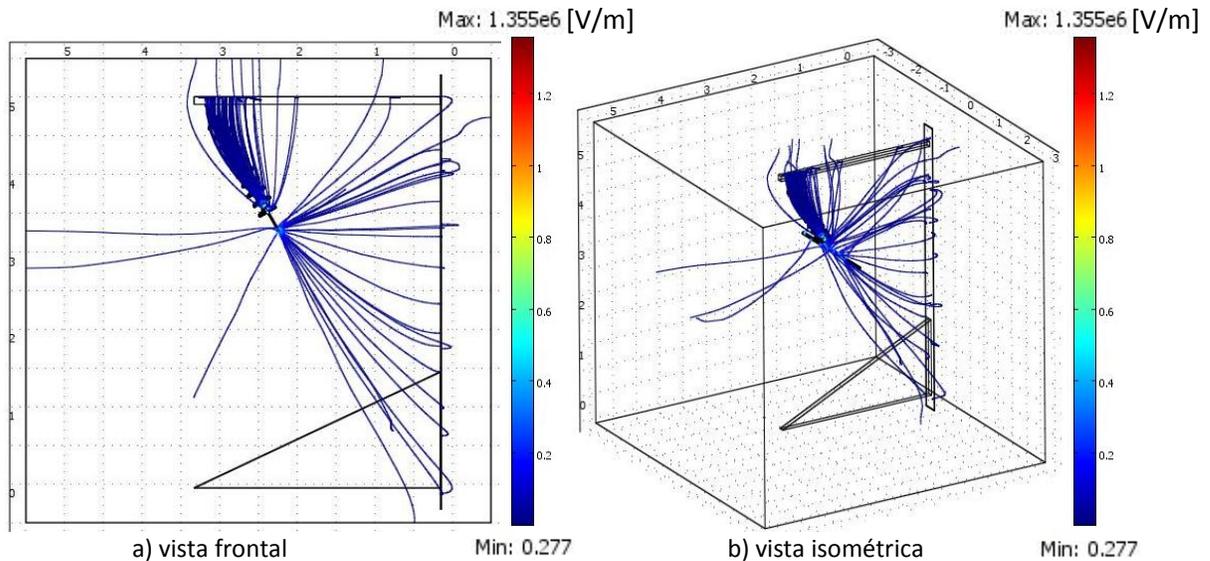


Figura 4.18. Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para torre E71A21.

La Figura 4.19 muestra las curvas de comportamiento del campo eléctrico a lo largo de la cadena de aisladores para la estructura E71A21 bajo un ángulo de balanceo. En el caso de campo eléctrico se observa un valor del segundo aislador de la cadena similar en ambos casos 15 y 30°

(270,0 kV/m). El primer aislador de la cadena presenta un valor máximo próximo de 810,0 kV/m para 15° y de 970,0 kV/m para 30° de ángulo de deflexión ó balanceo.

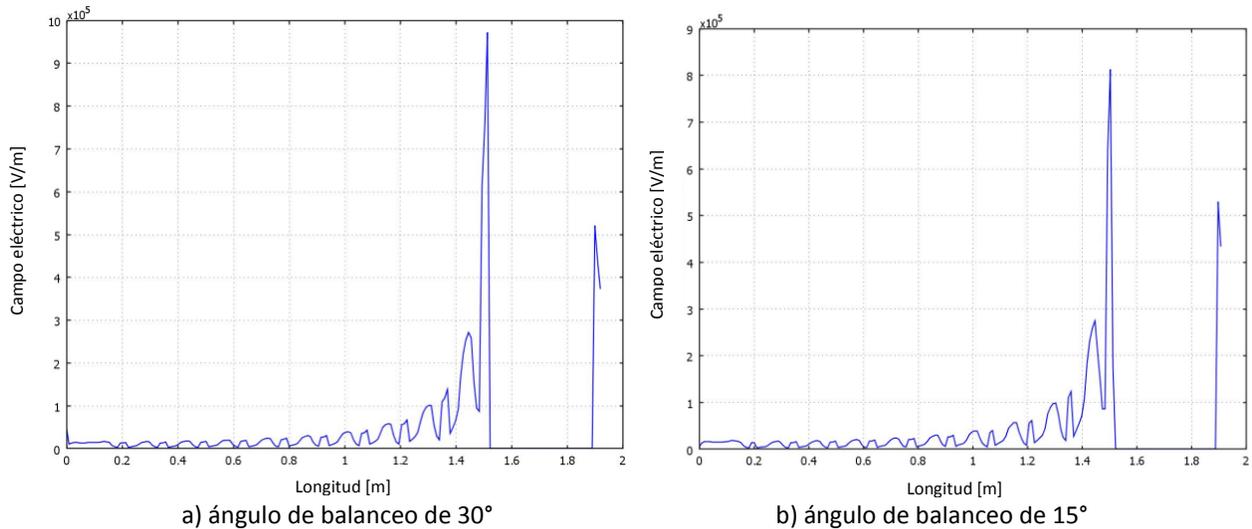


Figura 4.19. Campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV con ángulo de balanceo para torre E71A21.

Las Figuras 4.12 a 4.15 muestran el comportamiento del campo eléctrico y la distribución de potencial a lo largo de la cadena de aisladores para la estructura tipo poste troncocónico 1210SMP para los ángulos de balanceo de 15° y 30°, donde se observa que las diferencias del potencial son pequeñas mientras que el campo eléctrico presenta un cambio de magnitud visible siendo menor para el caso de 30° (960,0 kV/m) con respecto al de 15° (970,0 kV/m) de ángulo de balanceo. Las Figuras 4.16 a 4.19 muestran el comportamiento del campo eléctrico y distribución de potencial a lo largo de la cadena de aisladores para la estructura tipo torre autosoportada E71A21, donde se observa un incremento del campo eléctrico conforme aumenta el ángulo de balanceo.

4.4. Descripción geométrica de las líneas de transmisión de 230 kV

La cadena de aisladores en suspensión para este caso de estudio está conformada de 18 aisladores estándar tipo 25SVC111C (longitud de 2,7 metros), la altitud considerada para la determinación de la longitud de la cadena es 2000 msnm y el nivel de contaminación de 20 mm/kV_{ff} (media). Las estructuras normalizadas de la CFE consideradas para especificar las dimensiones del modelo son (Figura 4.20):

- Poste troncocónico AS2, tipo suspensión de 2 circuitos.

- Torre autoportada 2B2, tipo suspensión de 2 circuitos.

El calibre del cable conductor en este nivel de tensión es 900 kCM (29,51 mm de diámetro exterior) con un conductor por fase.

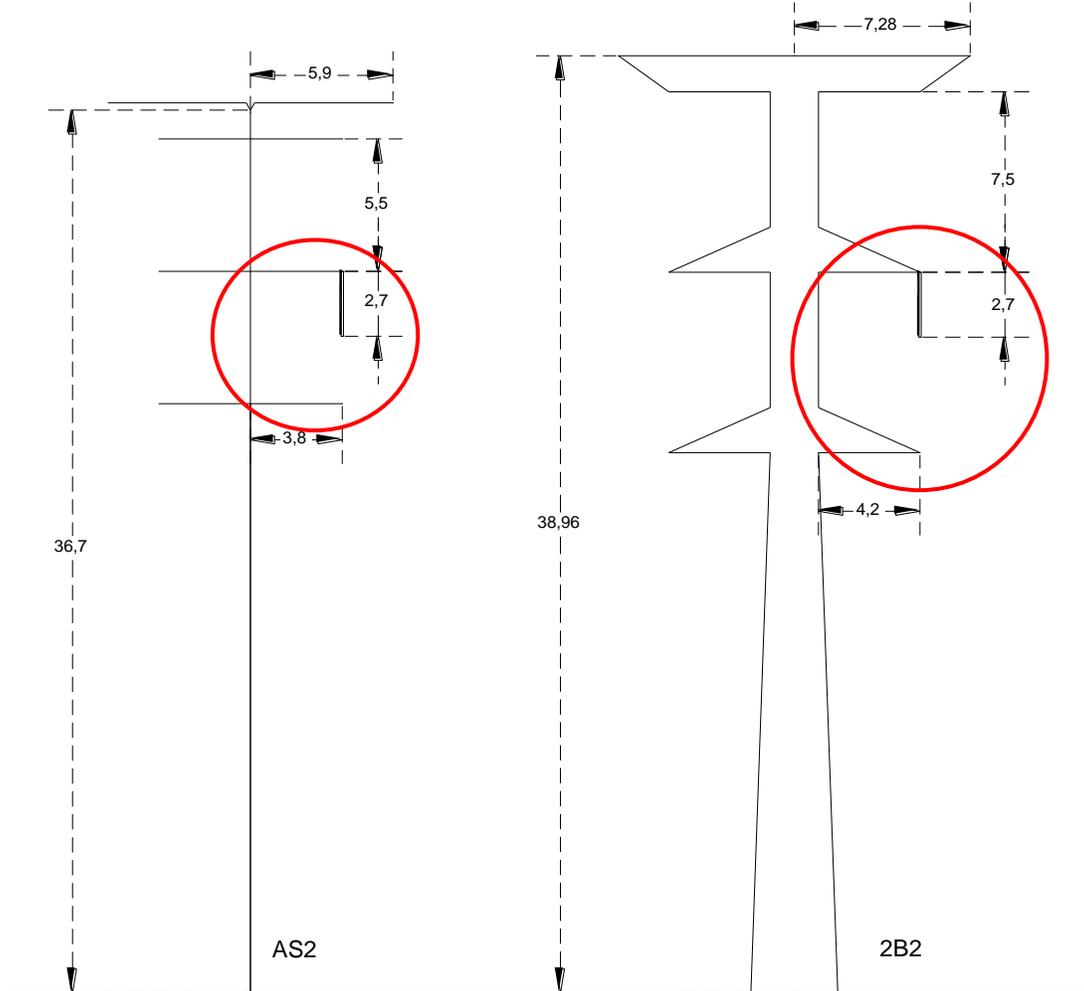


Figura 4.20. Dimensiones generales de estructuras de 230 kV de la CFE.

El modelo geométrico para el análisis del campo eléctrico y la distribución de potencial en las cadenas de aisladores, para estructuras de 230 kV, establece una fuente de excitación (cable conductor) con un voltaje eficaz respecto a tierra de 132,791 kV. La cadena de aisladores presenta diferentes propiedades dieléctricas acorde a los elementos que la conforman (vidrio templado en el esbozo, cemento Portland, hierro en herrajes de sujeción, acero en la estructura, aluminio en cable conductor). Un nivel de potencial 0,0 kV del modelo geométrico se encuentra establecido en las condiciones de frontera para la representación de los brazos ó crucetas inferior y medio de las estructuras, así como el cuerpo recto.

Todos los elementos previos se encuentran inmersos dentro de fronteras exteriores de dimensiones cúbicas de 8 por 8 metros para el caso del poste AS2 y de 8 por 8 por 11,52 metros de alto para la torre 2B2.

4.4.1. Campo eléctrico y distribución de potencial en cadena de aisladores en disposición vertical para 230 kV

Los modelos tridimensionales desarrollados para análisis por el método de los elementos finitos para el poste AS2 y la torre 2B2 se observan en las Figuras 4.21a 4.36. Como parte de los modelos se establece una sección de conductor 900 kCM de 2 metros de longitud.

La Figura 4.21 muestra la distribución del potencial en la cadena de aisladores desde tres vistas diferentes. Los dos primeros aisladores de la cadena se encuentra por encima de los 40,0 kV, que representa el 30% del valor máximo (132,791 kV) de potencial. Los restantes dieciséis aisladores de la cadena presentan una distribución de potencial más homogénea y por debajo de los 50,0 kV. Como resultado, solamente el 11% de la longitud de la cadena se encuentra esforzada con valores superiores al 30% del potencial máximo y el restante 89% de la longitud de la cadena se encuentra esforzada por debajo del 30%. El comportamiento de la distribución del potencial se observa en forma de escala de color acorde a la barra lateral donde el valor máximo es 1,328e5 V (132,791 kV) y el mínimo 0,0 kV.

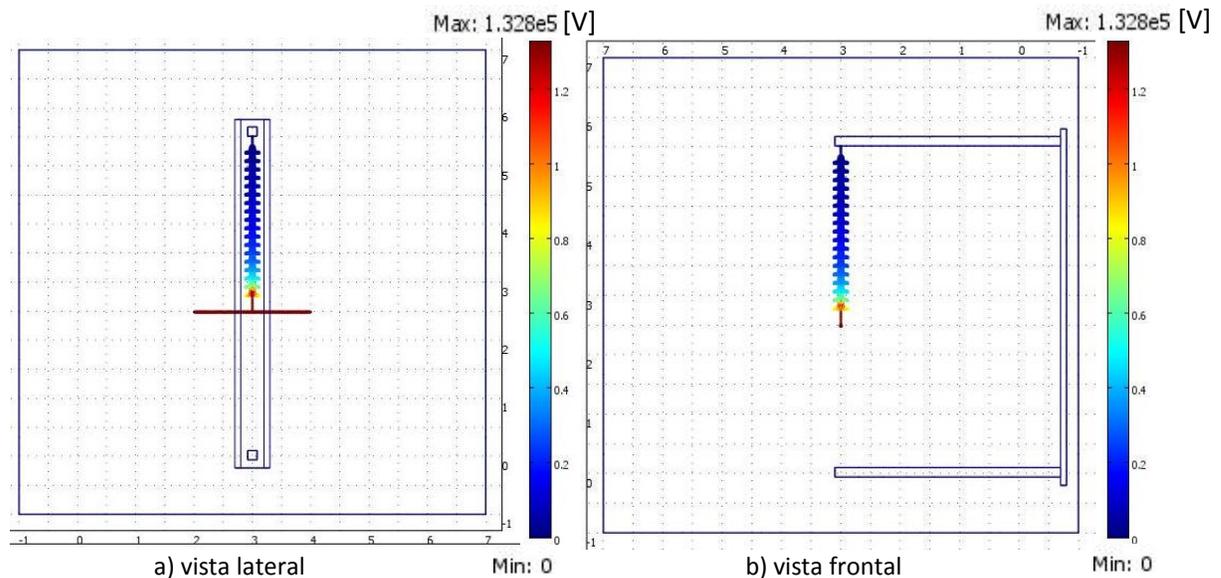
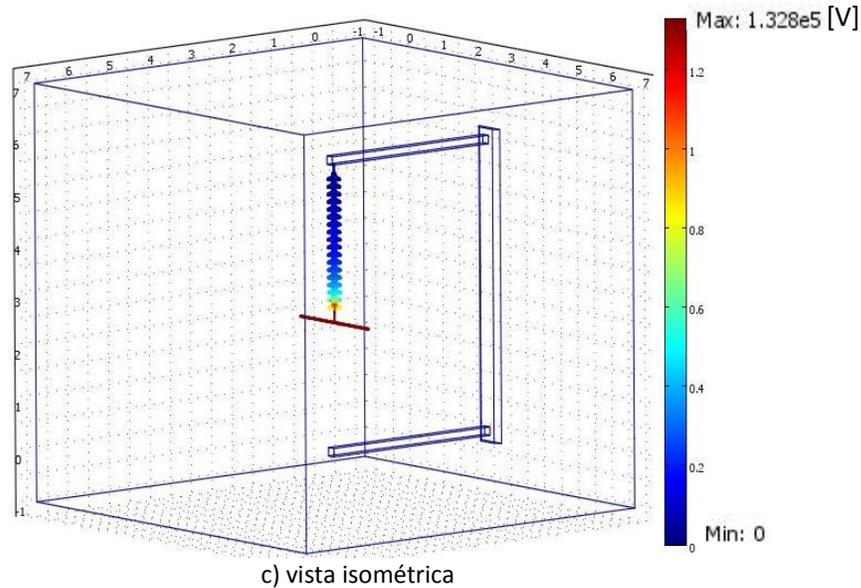


Figura 4.21. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con disposición vertical en poste AS2.



c) vista isométrica
Figura 4.21. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con disposición vertical en poste AS2. *Continuación.*

En la Figura 4.22 se observa el comportamiento de la distribución del potencial a lo largo de la cadena de aisladores y a través del aire, desde la fuente de excitación hasta el extremo del brazo inferior de la estructura. El valor máximo es 132,791 kV en el cable conductor y sus accesorios de enganche.

La parte izquierda de la Figura 4.22 muestra el comportamiento del potencial a lo largo de la cadena, observándose pequeñas protuberancias indicativas de los cambios en las propiedades dieléctricas, y la parte derecha de la gráfica muestra el comportamiento del potencial en el aire hasta alcanzar un valor nulo en el brazo inferior. En relación a los casos de cadenas de aisladores y estructuras para 115 kV, la no linealidad es más pronunciada como consecuencia de los cambios en las dimensiones y magnitud de la fuente de excitación.

Acorde a lo presentado por GAMMA [2005], la distribución del potencial en la superficie del esbozo de un aislador es del 70% del valor total en la zona entre el primer faldón del aislador y el interior del perno. Posteriormente, el potencial eléctrico se mantiene en un valor casi lineal a lo largo del esbozo hasta acercarse a la calavera donde se produce otra caída de potencial de un 23% aproximadamente. La Figura 4.22 muestra el comportamiento del potencial en la parte interna a lo largo de la cadena de aislamiento pero la determinación del potencial en el contorno del aislador es viable e importante mediante la aplicación del FEM para determinar mejoras en el diseño de los esbozos ante diversas condiciones operativas.

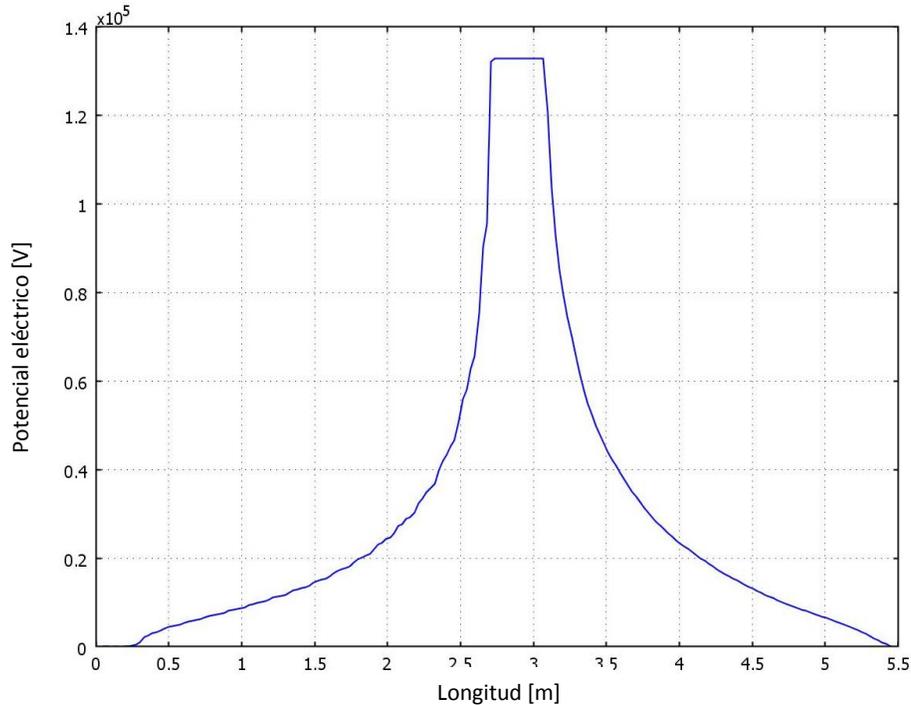


Figura 4.22. Distribución de potencial a lo largo de cadena de aisladores de 230 kV en disposición vertical para poste AS2 (distancia brazo medio a brazo inferior de la estructura).

La Figura 4.23 presenta el comportamiento del campo eléctrico en el entorno de la cadena de aisladores desde tres perspectivas diferentes (frontal, lateral e isométrica). Se observa que gran parte de las líneas de flujo del campo eléctrico pasan a través de los faldones en los primeros aisladores. Conforme se acercan a la estructura las líneas se dispersan en la periferia de los faldones y consecuentemente la intensidad del campo es menor. Se presenta también mayor intensidad de campo eléctrico en la cercanía del brazo de la estructura AS2 a diferencia del cuerpo recto, donde no se observa más que una línea de flujo del campo eléctrico. La mayor distancia del aire entre la fuente de excitación (conductor) y el cuerpo recto de la estructura de 230 kV con respecto a las estructuras de 115 kV influye en este comportamiento.

Los valores máximos y mínimos del campo eléctrico presentados en la escala de la Figura 2.23 son respectivamente 2050,0 kV/m y 4,348 V/m respectivamente. Con relación al valor máximo obtenido en la Figura 2.24 (520,0 kV/m) es mayor aproximadamente cuatro veces. Las diferencias son importantes de tal forma que es significativo considerar los valores máximos del modelo numérico probando los diferentes tipos de visualización de los resultados. Aun así, las gráficas de comportamiento como las Figuras 2.23 y 2.24 son relevantes en el análisis de los fenómenos de esfuerzos eléctricos.

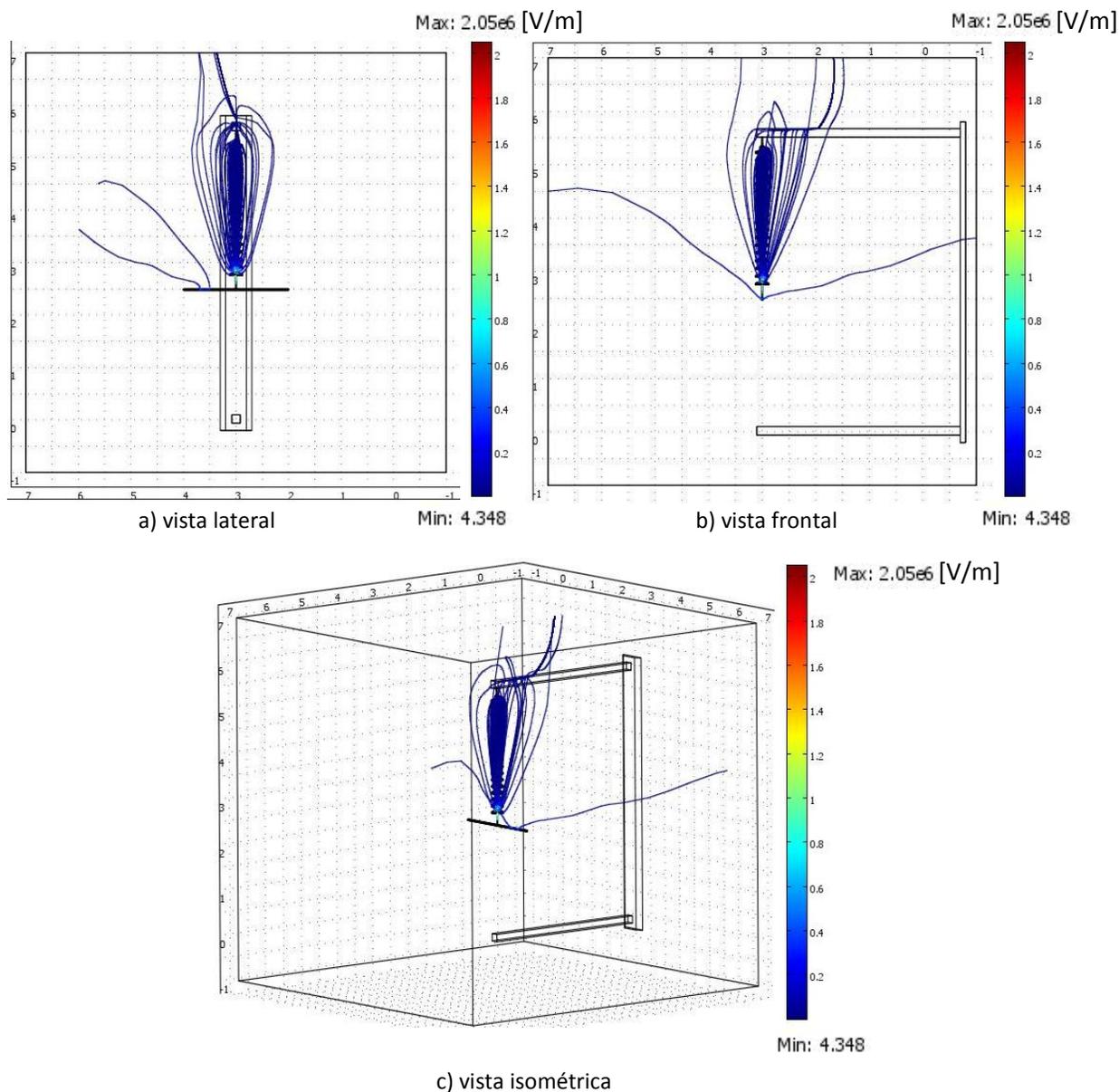


Figura 4.23. Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 230 kV con disposición vertical en poste AS2.

La Figura 4.24 muestra el comportamiento del campo eléctrico. En la curva se observa que en la parte izquierda, aproximadamente a 1 metro de distancia de la fuente de excitación (punto 1,7 del eje vertical), el nivel de campo eléctrico disminuye y se mantiene hasta alcanzar el último aislador de la cadena, donde aumenta la intensidad un poco, y es mínimo en el brazo medio del poste AS2 (de 0 a 0,25 m aproximadamente del eje horizontal). En la parte derecha de la curva, las propiedades dieléctricas continuas del aire influyen en el comportamiento del campo eléctrico a lo largo de la cadena.

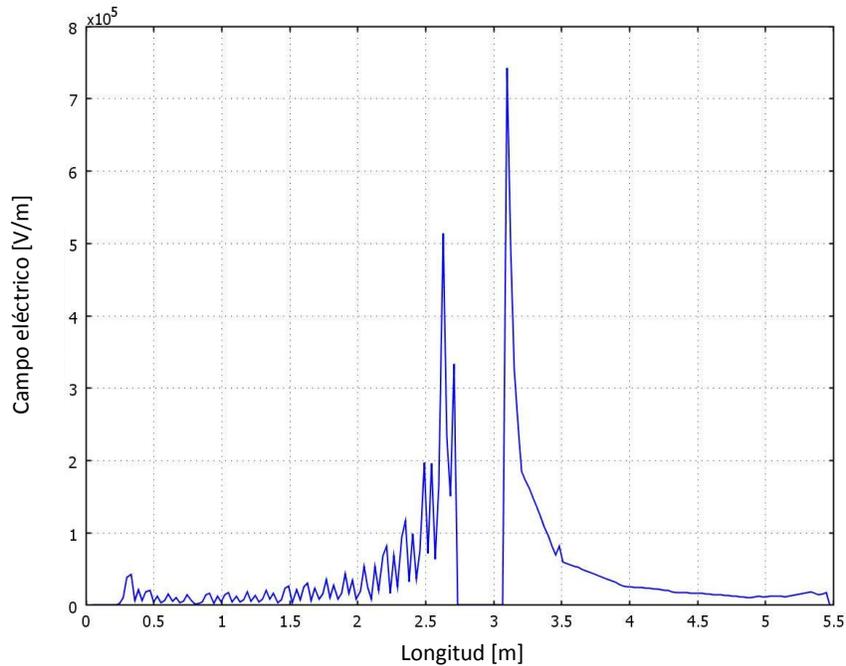


Figura 4.24. Campo eléctrico a lo largo de cadena de aisladores de 230 kV en disposición vertical para poste AS2 (distancia brazo medio a brazo inferior de la estructura).

La Figura 4.25 muestra la distribución del potencial a lo largo de la cadena de aisladores, donde el cable conductor, como fuente de excitación, presenta el valor de 132,791 kV. La no linealidad del comportamiento del potencial a lo largo de la cadena se mantiene presente, y es más pronunciada conforme se aumenta la cantidad de unidades, razón por la cual a partir de este nivel de tensión es práctica regular utilizar elementos para mejorar la distribución del potencial como los anillos equipotenciales [EPRI, 2005].

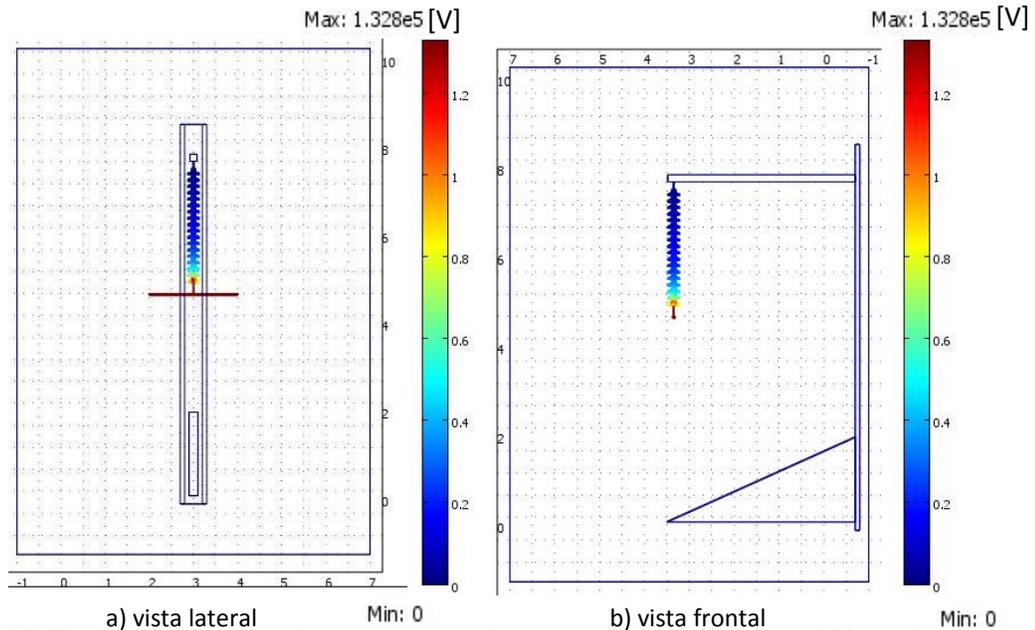


Figura 4.25. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con disposición vertical en torre

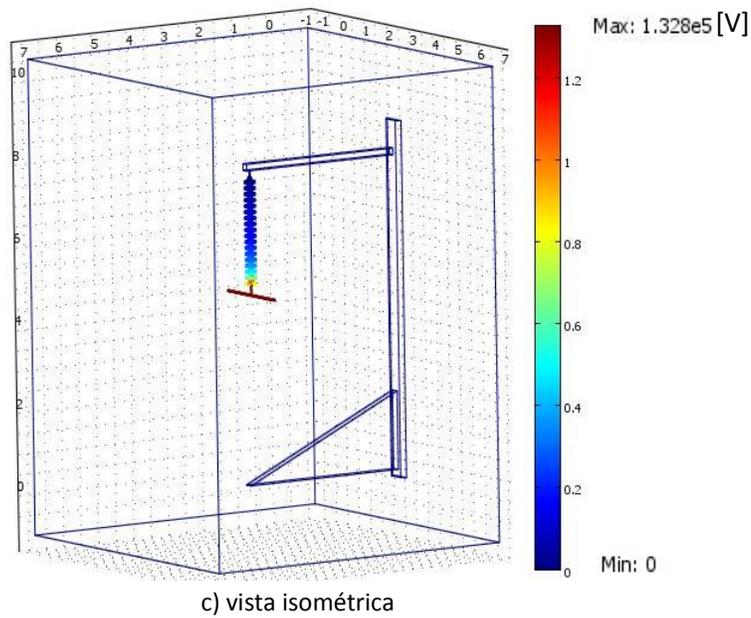


Figura 4.25. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con disposición vertical en torre 2B2. *Continuación.*

La curva del comportamiento de la distribución de potencial para el modelo geométrico de la estructura 2B2 se muestra en la Figura 4.26. Un valor máximo de 132,791 kV corresponde al cable conductor y sus herrajes de enganche con la cadena de aisladores. La parte derecha de la Figura 4.26 indica el valor del potencial en el aire desde el cable conductor hasta alcanzar el extremo de la cruceta inferior de la torre 2B2 para una línea recta paralela a la cadena. La distancia entre las crucetas media e inferior es mayor en este caso (7,5 metros) que respecto al poste AS2 (5,5 metros) debido diversos factores (eléctricos, mecánicos, económicos, operativos, etc.).

La Figura 4.27 presenta tres vistas (frontal, lateral e isométrica) del campo eléctrico a lo largo de la cadena de aisladores y en el entorno mediante sus líneas de flujo de campo. La representación geométrica utilizada para la sección de la torre 2B2 muestra una sección del cuerpo recto, cruceta media y cruceta inferior. La zona interna y alrededor de la cadena de aisladores es el área en la cual las líneas del campo eléctrico se encuentran más concentradas, indicando intensidades mayores. En comparación con los casos de 115 kV, se observa que las líneas de flujo del campo para 230 kV no se ven influenciadas tanto con las fronteras externas del modelo numérico tridimensional que se incrementaron en 2 metros pasando de 6 a 8 metros respectivamente.

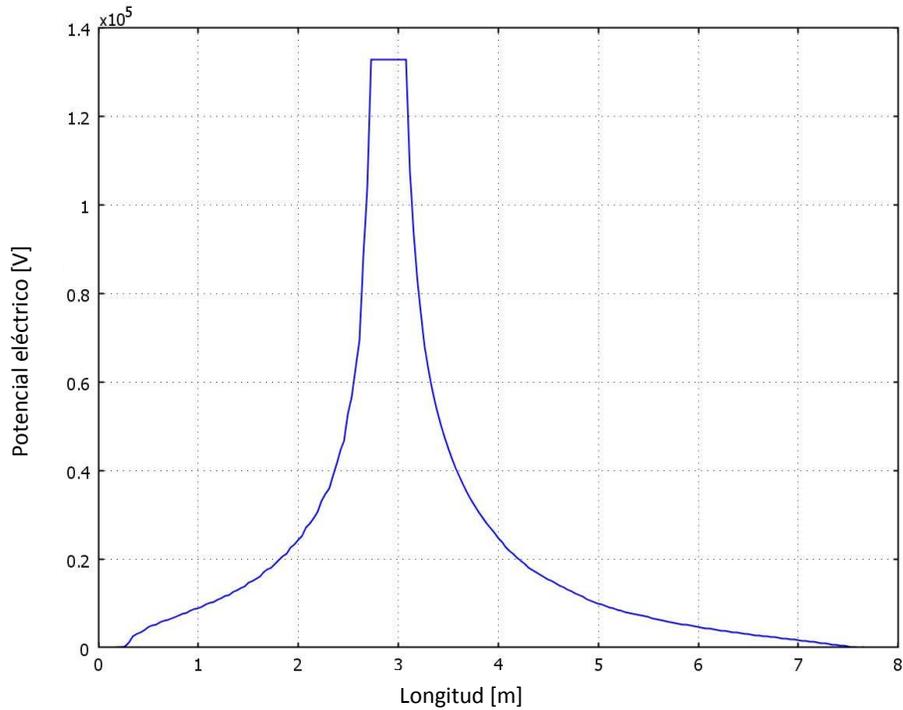


Figura 4.26. Distribución de potencial a lo largo de cadena de aisladores de 230 kV en disposición vertical para torre 2B2 (distancia cruceta media a cruceta inferior de la estructura).

El número de líneas de flujo del campo eléctrico definidas para representar la visualización en la Figura 4.27 dentro del programa de cómputo son cincuenta. Este tipo de representación facilita observar la trayectoria del campo eléctrico desde la fuente de excitación (cable conductor) y su interacción con el entorno que son: aire, cadena de aisladores, estructura y fronteras externas.

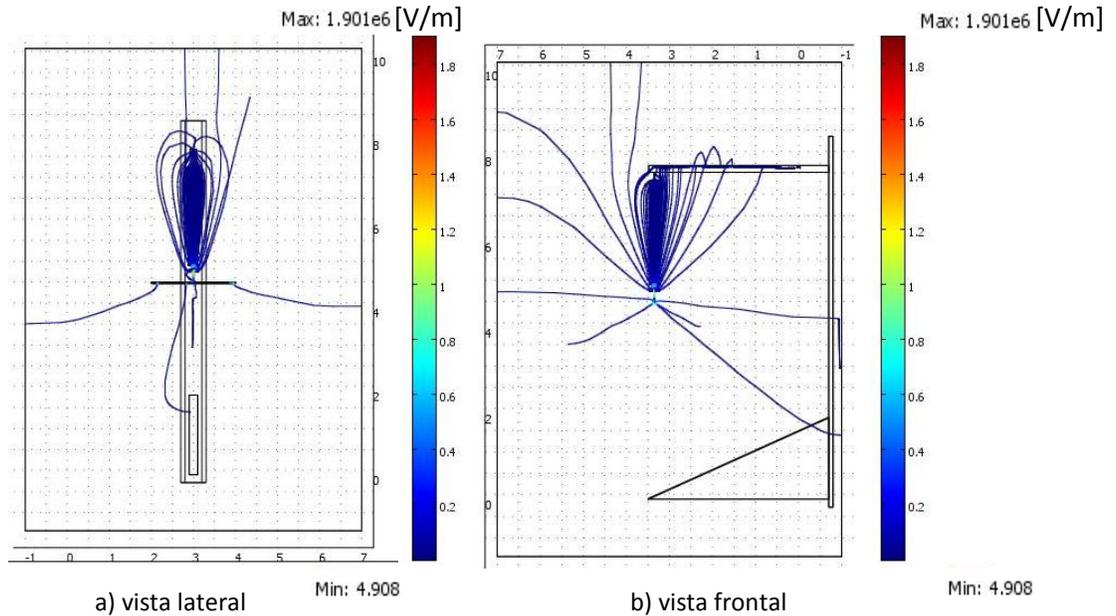
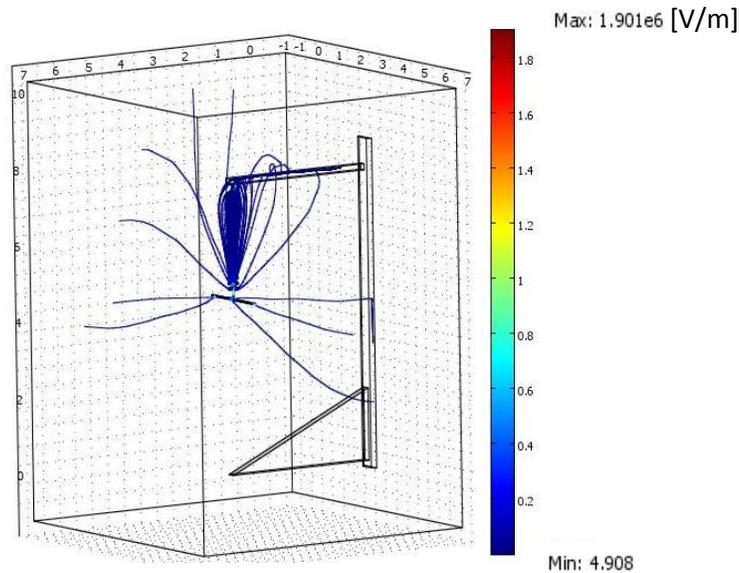


Figura 4.27. Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 230 kV con disposición vertical para torre 2B2.



c) vista isométrica

Figura 4.27. Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 230 kV con disposición vertical para torre 2B2.*Continuación.*

El campo eléctrico a lo largo de una trayectoria recta de 7,6 metros definida entre los extremos finales de las crucetas media e inferior de la torre 2B2 se presenta en la Figura 4.28. Se observa en la curva los cambios entre las propiedades dieléctricas de los medios, primero el comportamiento a lo largo de la cadena de aisladores, después la fuente de excitación (cable conductor y herrajes), y finalmente en el aire.

De las estructuras tipo AS2 y 2B2 para 230 kV se presenta una mayor intensidad del campo eléctrico a lo largo del centro de la cadena de aisladores para la torre 2B2 (Figura 4.28). Los valores máximos son 520,0 y 1270,0 kV/m respectivamente en ambas estructuras. Sin embargo, considerando los valores máximos mostrados en las Figuras 4.23 y 4.27 los valores máximos son 2050,0 y 1901,0 kV/m respectivamente. Debido a que las curvas 4.24 y 4.28 determinan el campo eléctrico en una trayectoria lineal para la parte central de la cadena de aisladores, el valor máximo del campo eléctrico es menor. Esto es porque la conformación geométrica y de las propiedades de los materiales dieléctricos influye estableciendo un valor mayor en las secciones con vértices más pronunciados. Consecuentemente, el perímetro del cemento, esbozo y perno presentan valores mayores del campo eléctrico. Con el fin de mejorar el diseño de un elemento aislante, para un mejor comportamiento respecto a la distribución de los esfuerzos eléctricos, las geometrías curvas y homogéneas son recomendables.

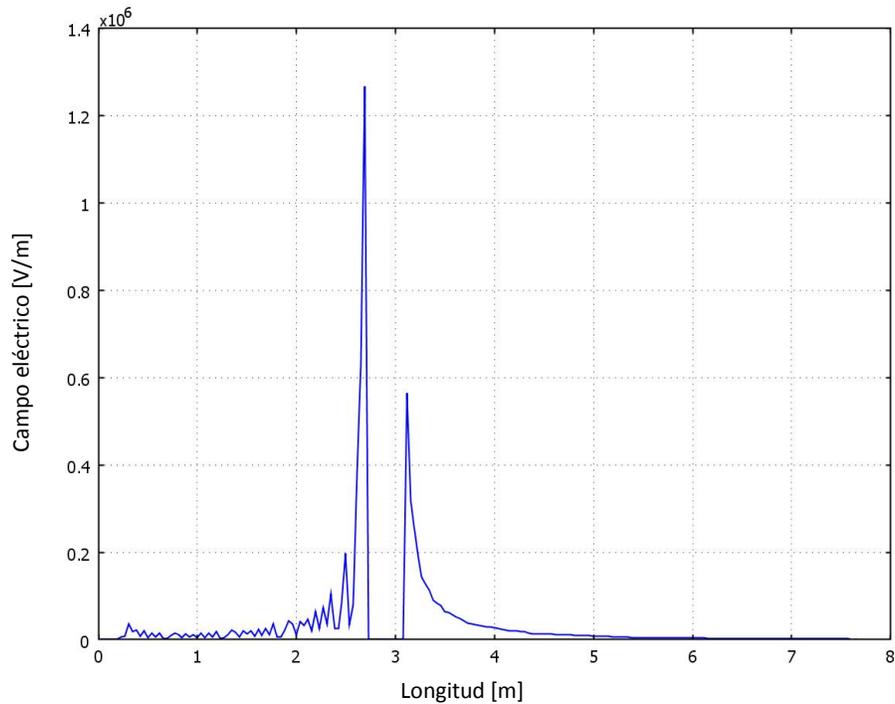


Figura 4.28. Campo eléctrico a lo largo de cadena de aisladores de 230 kV en disposición vertical para torre 2B2 (distancia cruceta media a cruceta inferior de la estructura).

4.4.2. Campo eléctrico y distribución de potencial en cadenas de aisladores con ángulo de balanceo para 230 kV

Los modelos numéricos tridimensionales desarrollados para análisis por el método de los elementos finitos para el poste troncocónico AS2 y la torre autosoportada 2B2 consideran ahora un ángulo de balanceo de 15 y 30° de la cadena de aisladores como se observan en las Figuras 4.29 a 4.36. Valores de ángulo de balanceo en sentido externo a la estructura no se consideran ya que los esfuerzos eléctricos máximos en la cadena se presentan al acercarse la misma a la estructura [Mehdi, 2010].

La Figura 4.29 muestra el comportamiento de la distribución del potencial a lo largo de la cadena de aisladores compuesta de 18 unidades bajo el efecto de un desplazamiento angular de 30° acorde a lo establecido por la NOM-001-SEDE-2005 [2006]. La mayor intensidad de potencial (132,791 kV) se encuentra en la fuente de excitación, que corresponde al cable conductor y los herrajes de enganche. La no linealidad de la distribución de potencial está presente como en la cadena de aisladores para disposición vertical.

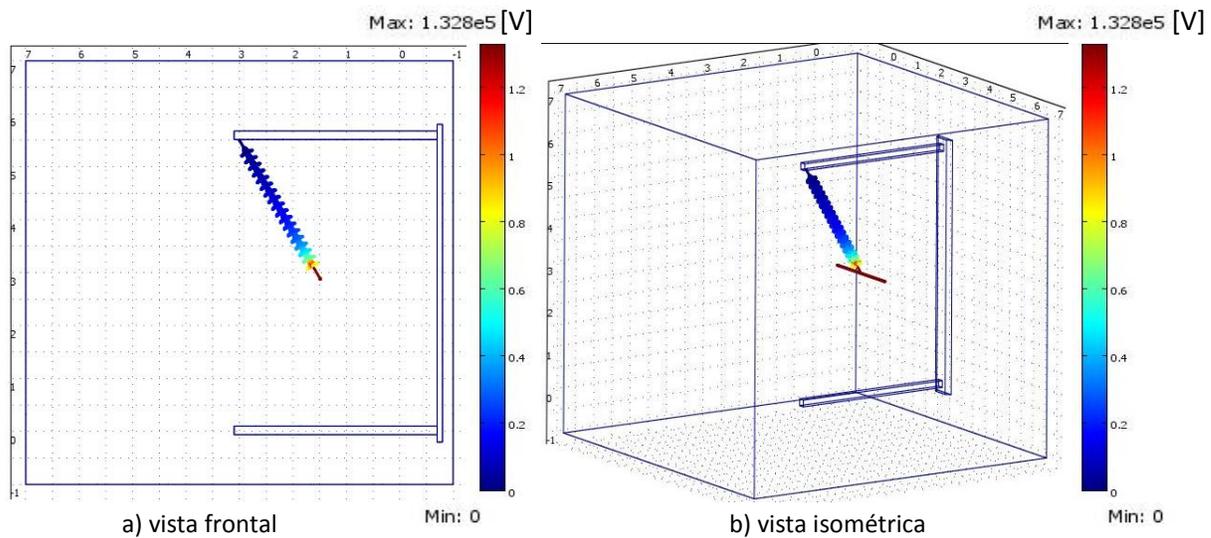


Figura 4.29. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para poste AS2.

La Figura 4.30 representa las curvas de comportamiento de la distribución del potencial para los casos de deflexión en la cadena de 30° y 15°. La diferencia entre las gráficas es pequeña, en el caso de 15° la pendiente es un poco más pronunciada después del valor máximo con respecto al caso de 30° lo que indica una distribución de potencial más proporcionada a lo largo de la cadena.

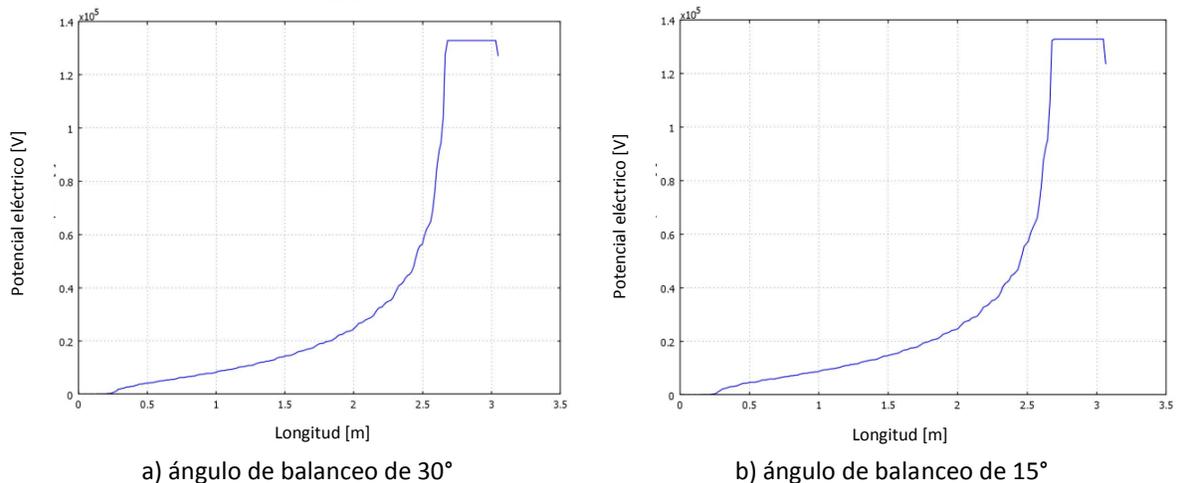


Figura 4.30. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para poste AS2.

El comportamiento del campo eléctrico mediante la representación de las líneas de campo en el entorno de la cadena muestra una fuerte intensidad alrededor de la cadena en la Figura 4.31. El campo eléctrico interactúa más con el brazo de poste AS2 debido al cambio de posición de la cadena de aisladores, la simetría que se observa en las líneas del campo eléctrico para este caso es menor que cuando la cadena está en disposición vertical (ver Figura 4.23).

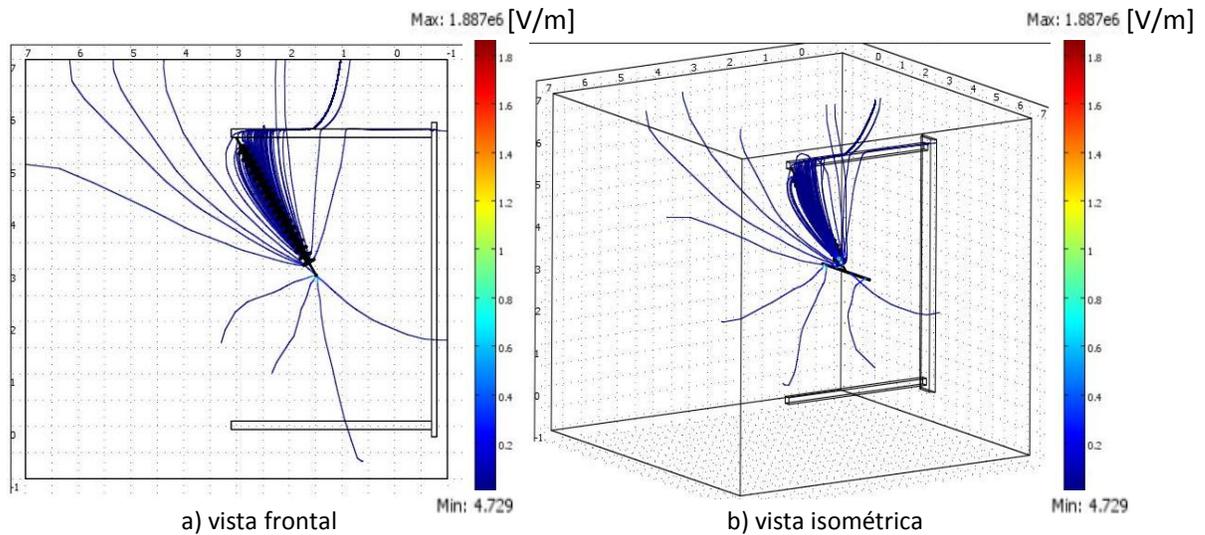


Figura 4.31. Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para poste AS2.

El comportamiento del campo eléctrico a lo largo de la cadena de aisladores mostrado en la Figura 4.32, indica que en el primer medio metro de la cadena el esfuerzo eléctrico soportado está aproximadamente por arriba del 10% del valor máximo, mientras que en el resto de la cadena se mantiene alrededor ó debajo del 10%. Para el caso de 15° de deflexión el valor máximo de campo resulta ser 1320,0 kV/m y para el caso de 30° es aproximadamente 1860,0 kV/m.

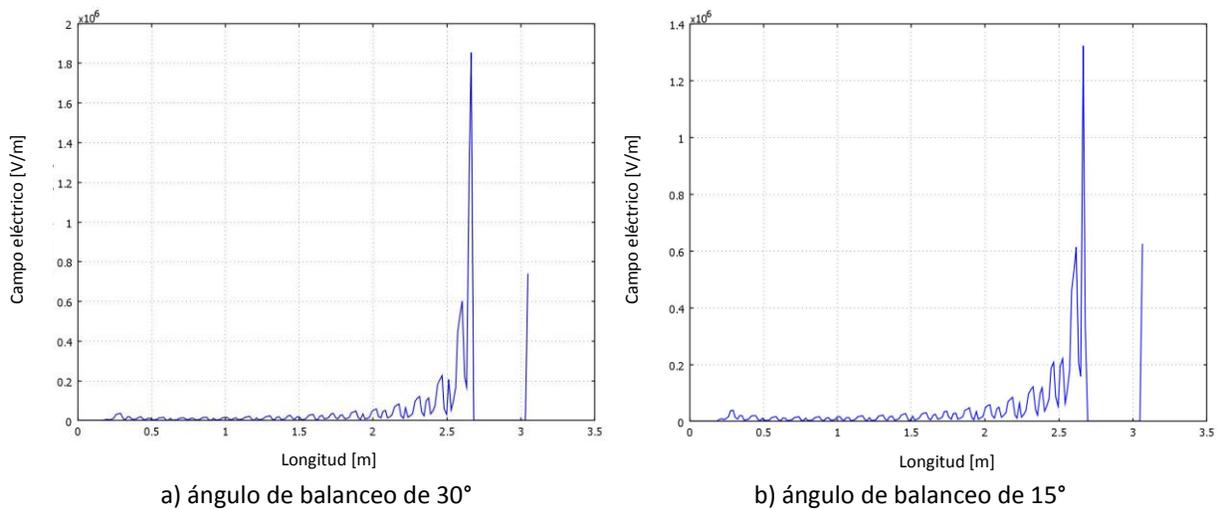


Figura 4.32. Campo eléctrico en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para poste AS2.

En la Figura 4.33 se observa la distribución de potencial a lo largo de la cadena de aisladores considerando un ángulo de balanceo de 30°. El comportamiento no lineal en la misma se mantiene presente y la mayor parte del esfuerzo eléctrico se concentra en las primeras cuatro unidades de la cadena. Toda la sección de la torre 2B2 modelada se encuentra a potencial 0,0 kV, ya que esta aterrizada como sucede en las estructuras de las líneas de transmisión.

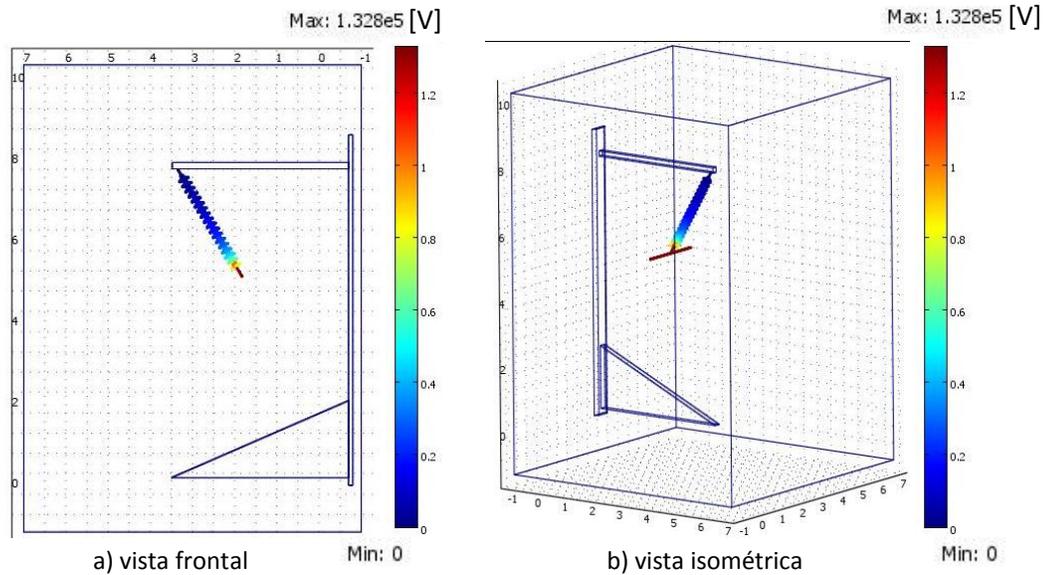


Figura 4.33. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para torre 2B2.

La Figura 4.34 muestra el comportamiento del potencial a lo largo de la cadena de aisladores para ángulos de balanceo de 15 y 30°. En las primeras tres unidades de la cadena (44 centímetros), que solamente representan aproximadamente el 15% de la longitud total de la cadena, el potencial eléctrico se encuentra por encima del 30% del valor máximo (132,791 kV) mientras que el resto de las unidades se encuentran por debajo de este valor.

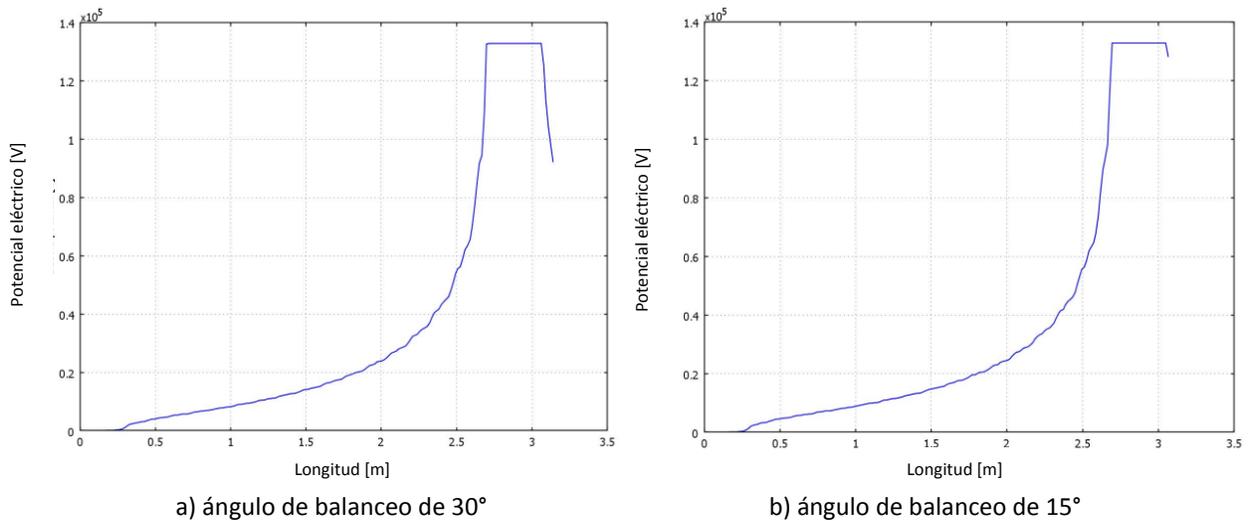


Figura 4.34. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para torre 2B2.

La Figura 4.35 muestra las líneas del campo eléctrico presentes en el entorno de los aisladores con un ángulo de balanceo de 30°. En la parte final de la cadena de aisladores se observa que el campo eléctrico interactúa más con la cruceta media de la torre 2B2 que para el caso de deflexión vertical (Figura 4.27). Esto es consecuencia del cambio de posición de la cadena.

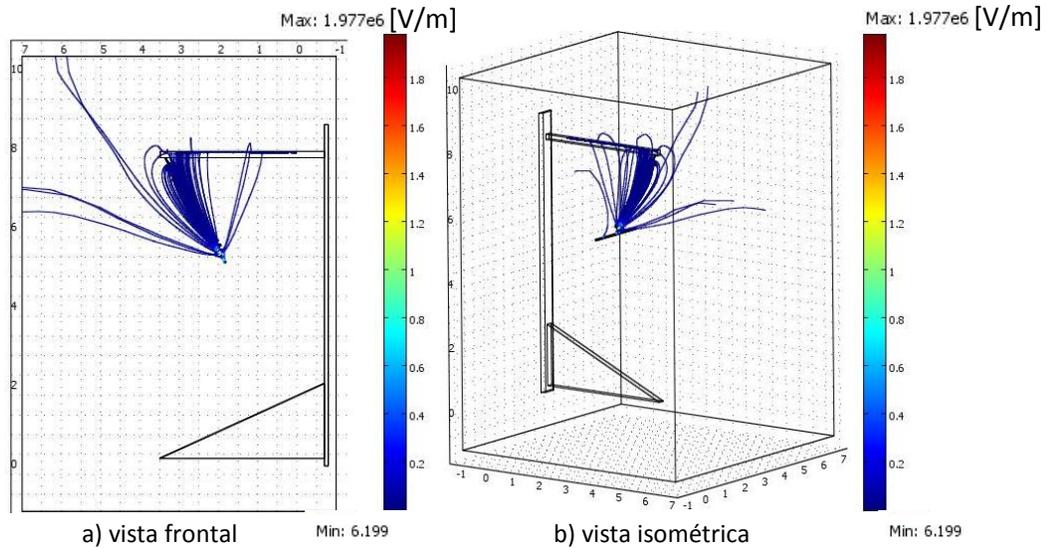


Figura 4.35. Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para torre 2B2.

La Figura 4.36 muestra el comportamiento del campo eléctrico a lo largo de la cadena de aisladores considerando deflexiones de 30 y 15°. Al acercarse la fuente de excitación (cable conductor) al cuerpo recto de la torre 2B2 el campo eléctrico en la cadena de aisladores es 1410,0 kV para 30° y 1670,0 kV para 15°.

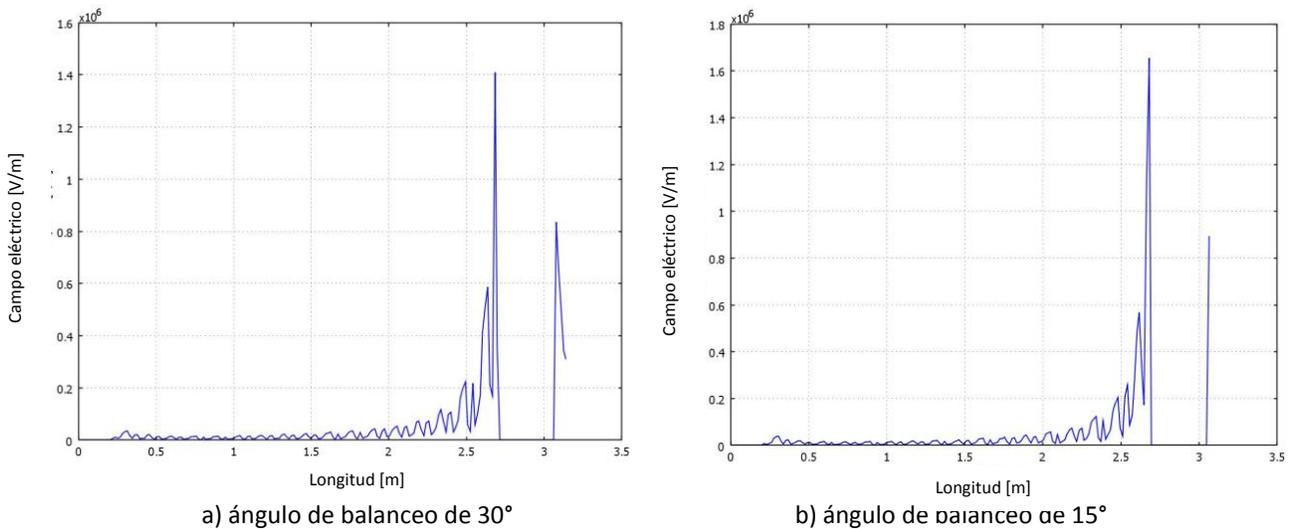


Figura 4.36. Campo eléctrico en cadena de aisladores de 230 kV con ángulo de balanceo para torre 2B2.

Para la estructura AS2 se observa que el potencial (Figuras 4.29 y 4.30) presenta cambios pequeños en las curvas de comportamiento considerando ángulos de balanceo de 15 y 30°. El campo eléctrico (Figuras 4.31 y 4.32) si muestra diferencias visibles en las gráficas siendo mayor el campo eléctrico para el caso de 30° de ángulo de balanceo en la cadena de aisladores.

Para la estructura 2B2 se muestran cambios en el potencial (Figuras 4.33 y 4.34), y consecuentemente la eficiencia de la cadena de aisladores. El campo eléctrico presenta diferencias visibles, siendo mayor el campo para el caso de 15° de ángulo de balanceo (Figura 4.36) en la cadena de aisladores.

Aunque la eficiencia de la cadena está definida para considerar la distribución de potencial en las cadenas de aisladores, el concepto puede aplicarse al campo eléctrico con la finalidad de evaluar el desempeño eléctrico a lo largo de la cadena de aisladores.

4.5. Descripción geométrica de las líneas de transmisión de 400 kV

La cadena de aisladores en suspensión bajo estudio está conformada de 25 aisladores, uno estándar tipo 25SVC111C y 24 tipo niebla 25SVC111CC (longitud de 3,65 metros), la altitud considerada para la determinación de la longitud de la cadena es 2000 msnm y el nivel de contaminación de 20 mm/kV_{ff} (media).

La estructura de la CFE considerada para especificar las dimensiones del modelo es (Figura 4.37):

- Torre autosoportada EA4A22MA, tipo suspensión de 2 circuitos.

El calibre del cable conductor en este nivel de tensión es 1113 kCM (31,96 mm de diámetro exterior) con dos conductores por fase.

El modelo geométrico para el análisis del campo eléctrico y la distribución de potencial en la cadena de aisladores para la estructura de 400 kV presenta una fuente de excitación (cables conductores en haz) con un voltaje nominal respecto a tierra establecido de 230,940 kV. El nivel de potencial cero (tierra) se encuentra definido en la representación de las crucetas media e inferior de la estructura.

Como parte del análisis de cadenas de aisladores de 400 kV se establecen modelos de las cadenas de aisladores y herrajes simplificados debido a limitantes del equipo de cómputo empleado. Se consideran 2 aisladores en la parte terminal del conductor y un aislador en la sección de enganche con la estructura para las cadenas en configuración "V". Todos los elementos

previos se encuentran inmersos dentro de una frontera externa de dimensiones cúbicas de 15 por 15 metros.

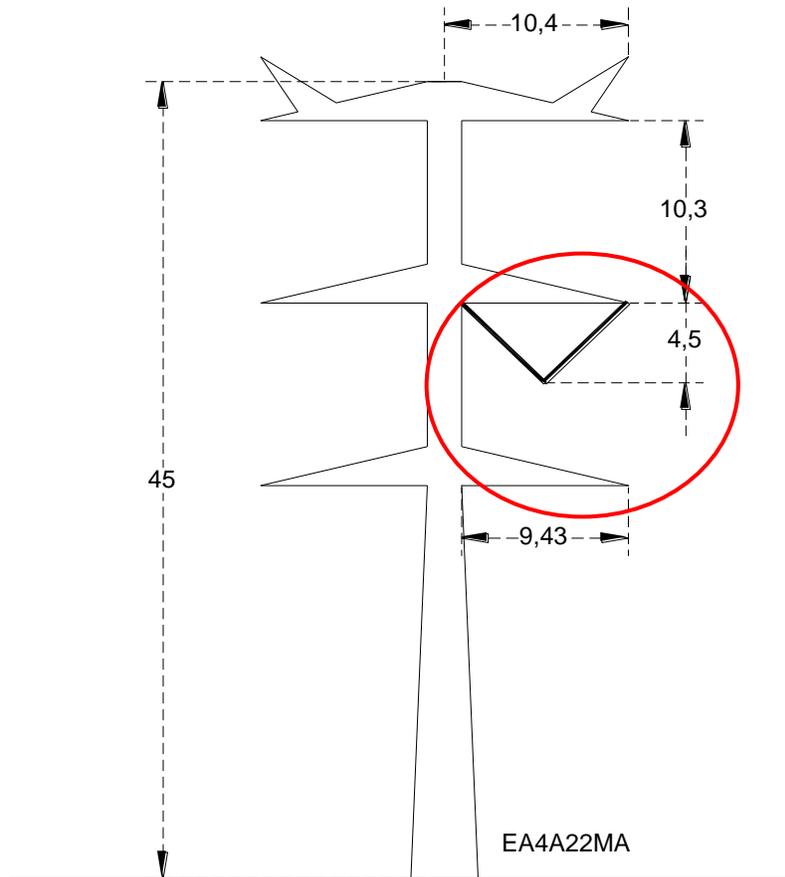


Figura 4.37. Dimensiones generales de estructura de 400 kV de la CFE.

4.5.1. Campo eléctrico y distribución de potencial en cadena de aisladores en disposición vertical para 400 kV

Debido a que las cadenas de aisladores en configuración "V" representan un arreglo en el que la carga por viento ocasiona un ángulo de balanceo muy pequeño, respecto a la distancia hacia la estructura, en este caso de estudio, y para esta estructura en particular, solo se considera un caso base para determinar la distribución de potencial y el campo eléctrico.

La Figura 4.38 muestra tres vistas (frontal, lateral e isométrica) del modelo geométrico tridimensional establecido de la torre EA4A22MA y la distribución del potencial a lo largo de las cadenas de aisladores. El esfuerzo eléctrico no lineal es visible ya que prácticamente la mitad de la

longitud de la cadena presenta un potencial debajo de 50,0 [kV], que representa solamente el 21% del valor máximo del potencial.

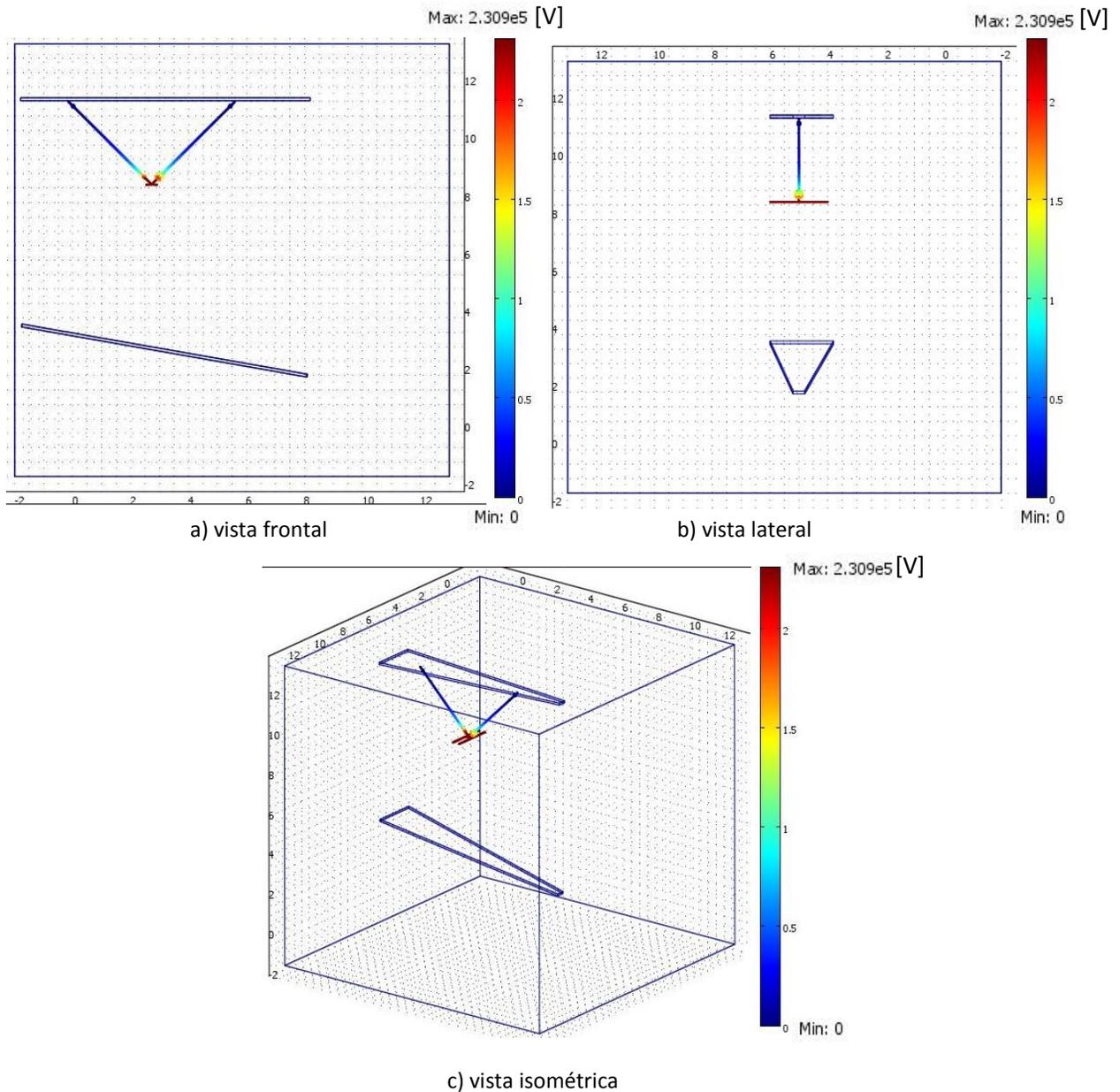


Figura 4.38. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 400 kV en configuración "V" para torre EA4A22MA.

La Figura 4.39 muestra de manera clara el comportamiento no lineal a lo largo de la cadena de aisladores de 400 kV. El valor máximo de 230,940 kV se presenta en los cables conductores en haz y sus accesorios de enganche. La gráfica del comportamiento del potencial es parecida en ambas cadenas de aisladores, tanto la izquierda como la derecha.

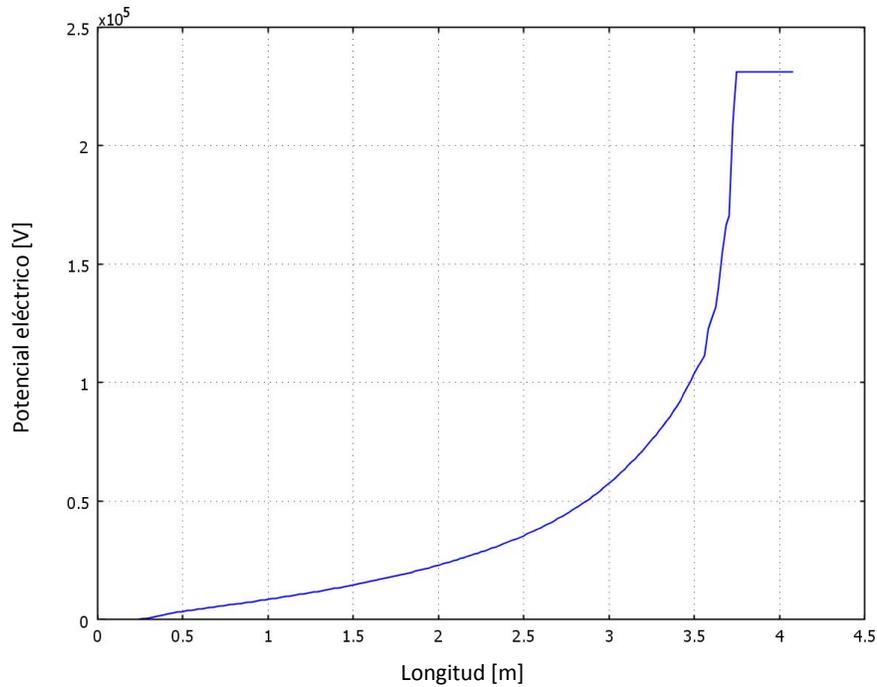


Figura 4.39. Distribución de potencial en cadena de aisladores de 400 kV en configuración “V” para torre EA4A22MA.

En la Figura 4.40 se observa el comportamiento del campo eléctrico cerca de las cadenas de aisladores mediante las líneas de campo. El campo eléctrico se distribuye entre las dos secciones de la cadena de aislamiento. Se presenta una mayor interacción de las líneas de flujo de campo eléctrico de la cadena derecha del conjunto de aislamiento con la estructura (ver Figura 4.40, vista frontal), esto es debido a un mayor grado de detalle definido en la cadena derecha.

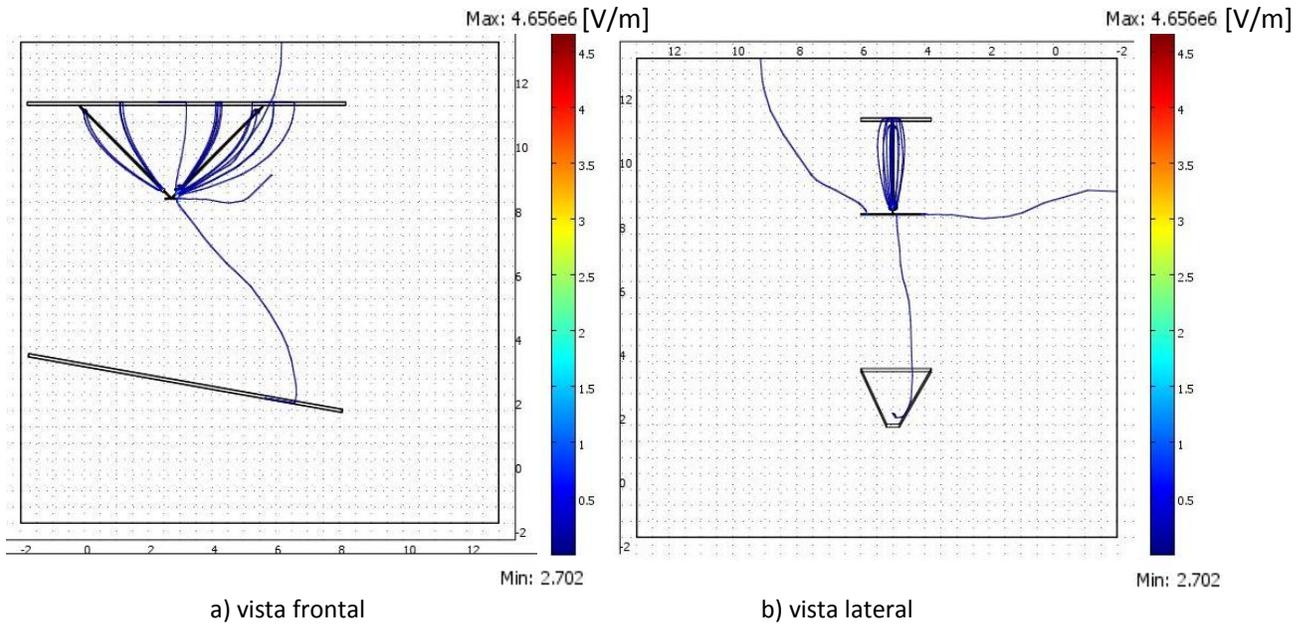


Figura 4.40. Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 400 kV en configuración “V” para torre EA4A22MA.

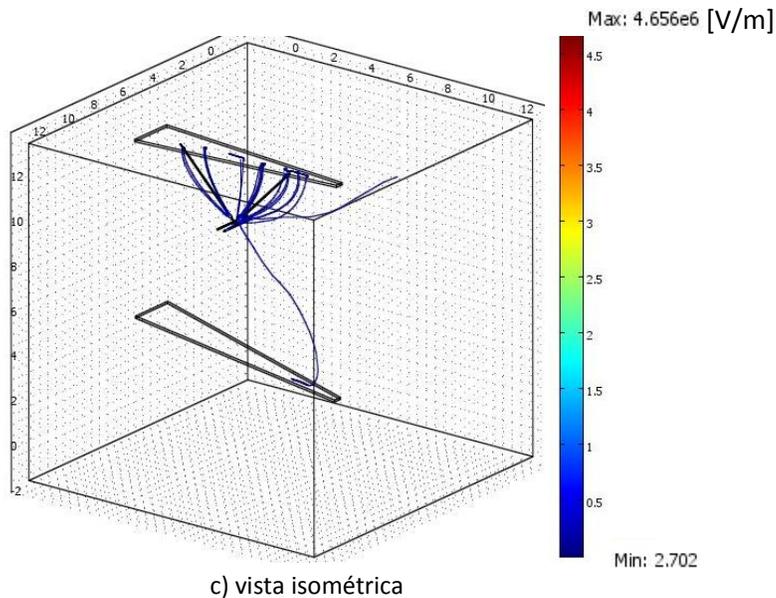


Figura 4.40. Líneas de flujo de campo eléctrico en cadena de aisladores de 400 kV en configuración “V” para torre EA4A22MA. *Continuación.*

La Figura 4.41 muestra la gráfica del comportamiento del campo eléctrico a lo largo de una de las cadenas de aisladores. El valor máximo presente del campo es de aproximadamente 3800,0 kV/m que es el mayor de todos los casos de estudio para 115, 230 y 400 kV. Comparando este valor con respecto al necesario para que el aire se vuelva un conductor que es de aproximadamente 3000,0 kV/m [Hewitt, 1995] observamos un incremento del 26%. Como consecuencia, los efectos de los fenómenos que ocasionan pérdidas y daños en los elementos en la línea de transmisión (corona, térmicos, envejecimiento prematuro, descargas parciales, etc.) son mayores.

El comportamiento y la intensidad del campo eléctrico a lo largo de las cadenas de aisladores del conjunto en “V” para 400 kV debe ser menor a 3800,0 kV/m, cuando todos los aisladores de las cadenas se encuentran modelados a causa de los efectos capacitivos y los cambios en las propiedades dieléctricas de los elementos constitutivos de la cadena. Adicionalmente, la aplicación de dispositivos que reducen el efecto corona (anillos equipotenciales).

Debido a restricciones del equipo de cómputo utilizado y un incremento en la complejidad del modelo de la cadena de aisladores para 400 kV, no se desarrollaron modelos geométricos tridimensionales completos de las cadenas en “V”. La aplicación de otro tipo de método numérico como el BEM para desarrollar este modelo puede resultar más viable.

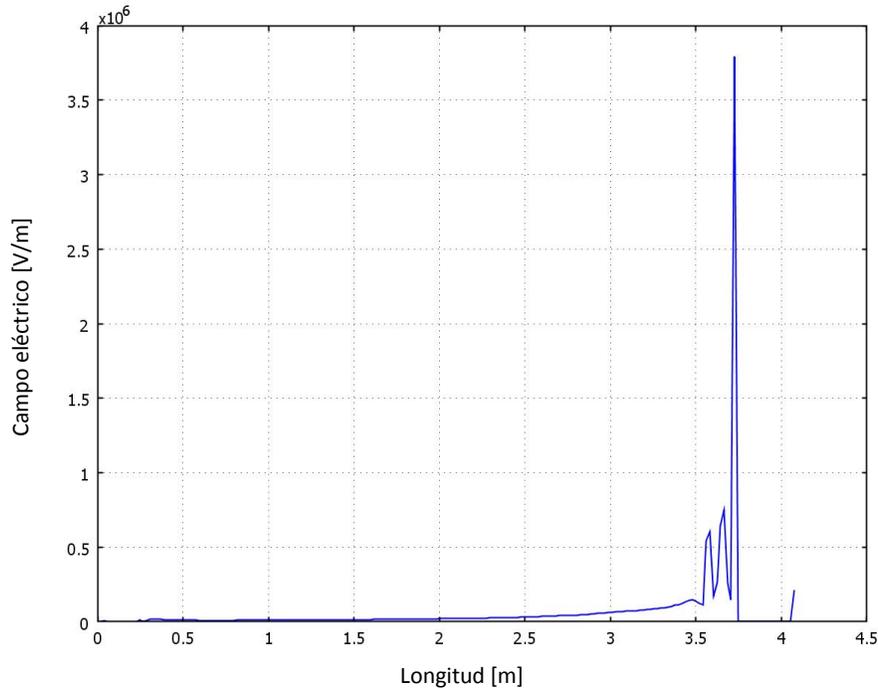


Figura 4.41. Campo eléctrico encadena de aisladores de 400 kV en configuración “V” para torre EA4A22MA.

4.6. Modelo geométrico de cadena de aisladores con cambios en longitud del cable conductor

Con la finalidad de analizar el comportamiento del campo eléctrico y la distribución del potencial en los modelos tridimensionales de las cadenas de aisladores realizados bajo diferentes condiciones se realiza un cambio en la longitud del conductor [Zhao, 2000]. La longitud del conductor en el caso de estudio del poste 1210SMP (115 kV) es incrementada al doble (4 metros). Las propiedades físicas de los elementos del modelo se mantienen igual que para los casos previos de estudio (cadena de aisladores, cable conductor y sección de estructura 1210SMP).

La interacción entre la longitud del conductor y la cadena de aisladores es importante, ya que se observan modificaciones en la distribución del potencial a lo largo de la cadena de aislamiento, se presenta un incremento en el potencial de 12,5 a 15,0 kV (20%) en la parte media de la cadena al observar el punto de distancia 2,5 dentro del eje horizontal de la Figura 4.42, concordando con los resultados obtenidos por [Zhao, 2000].

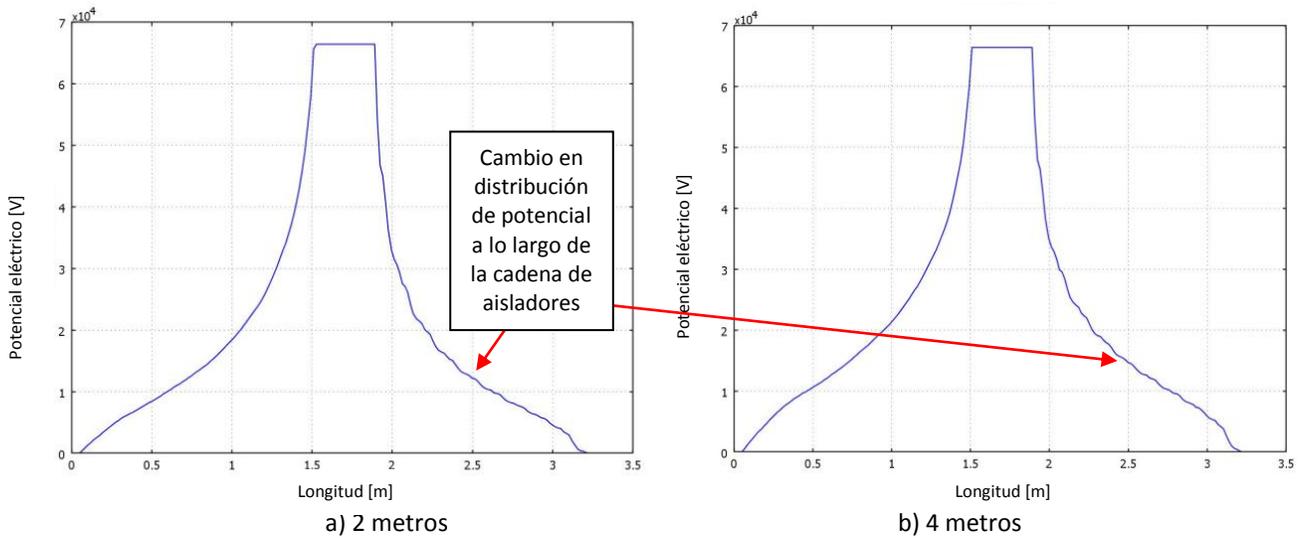


Figura 4.42. Comparativa de la distribución de potencial en cadena de aisladores de 115 kV para poste 1210SMP con longitudes de conductor diferentes.

El campo eléctrico en la Figura 4.43 presenta un decremento en sus valores máximos al aumentar la longitud del cable conductor, debido a que la distribución de los esfuerzos eléctricos abarca una mayor distancia en forma normal a la cadena de aisladores, de tal forma que los esfuerzos eléctricos se ven distribuidos en el entorno que involucra mayor interacción del campo eléctrico con el aire y la estructura y no solamente en las cercanías de las cadenas de aisladores. Para el poste 1210SMP el campo eléctrico máximo a lo largo del centro de la cadena de aisladores disminuye de aproximadamente 700,0 kV/m a 660,0 kV/m, al aumentar la longitud del conductor lo que representa un cambio del 6%.

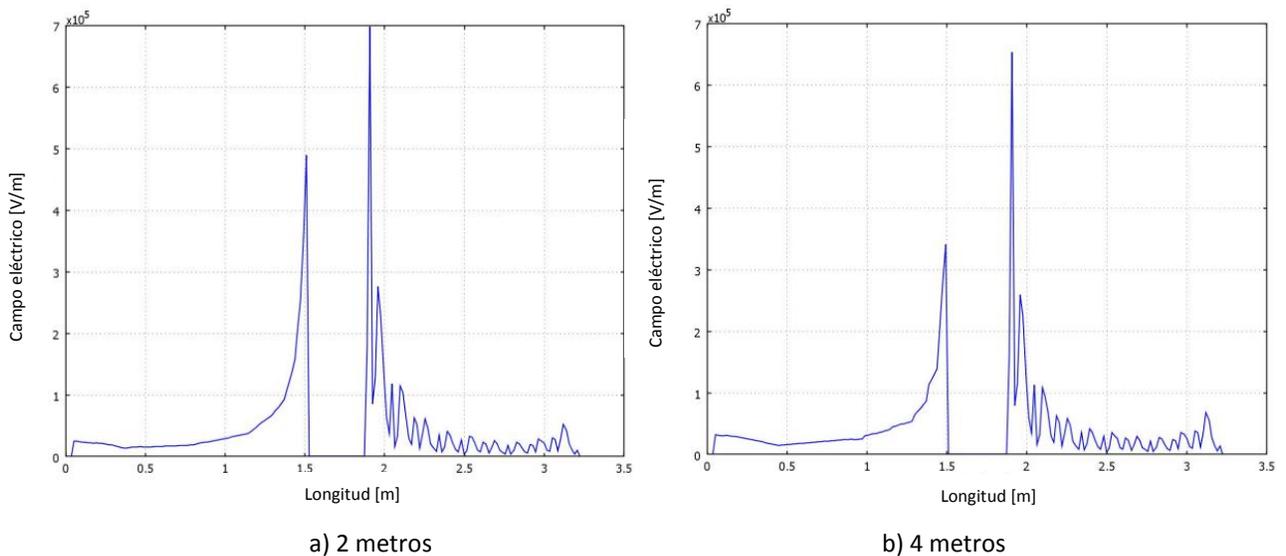


Figura 4.43. Comparativa del campo eléctrico en cadena de aisladores de 115 kV para poste 1210SMP con longitudes de conductor diferentes.

A partir de los resultados mostrados en las Figuras 4.42 y 4.43 se observa que la evaluación de modelos axisimétricos de cadenas de aisladores, donde la fuente de excitación es considerada como una carga puntual, no representa de manera correcta el comportamiento de la distribución e intensidad del campo eléctrico y el potencial. Esto concuerda con los resultados obtenidos por [Zhao, 2000] que establece: a) para la determinación del campo eléctrico y la distribución de potencial en los aislamientos, los modelos desarrollados a través de técnicas numéricas son una opción viable; b) para evaluar el campo eléctrico y la distribución de potencial en los conjuntos de aislamiento instalados y en operación, se requiere un modelo geométrico tridimensional que considere a la estructura y los conductores para evitar errores en la estimación de los valores; y c) se pueden realizar simplificaciones en el modelo geométrico tridimensional de los conjuntos de aislamiento sin perder precisión, siempre y cuando, elementos como la estructura y los conductores se encuentren representados dentro del mismo.

4.7. Modelo geométrico de cadena de aisladores con cambios en dimensión de fronteras

Con la finalidad de evaluar el comportamiento del campo eléctrico y la distribución de potencial en las cadenas de aisladores ante cambios en las dimensiones del modelo con respecto a las fronteras externas se presenta el caso de estudio descrito a continuación.

Para la sección de la estructura tipo poste troncocónico 1210SMP de 115 kV se establecen como fronteras externas del modelo geométrico un cubo de 20 metros (Figura 4.44). En el centro de este cubo se posiciona la fuente de excitación de 66,395 kV (cable conductor) y se utiliza un modelo simplificado de la cadena de aisladores de 115 kV. Posteriormente, se efectúa un decremento en porcentaje de las dimensiones de fronteras externas del modelo geométrico de estudio respecto a las originales. La reducción es de 80% con respecto al modelo previo respectivamente, este cambio se efectúa cuatro veces de tal forma que las dimensiones de la frontera externa son: 20; 16; 12,80; 10,240 y 8,192 metros. La densidad de la malla realizada de respecto al número de elementos finitos que conforman el modelo numérico presenta diferencias de aproximadamente el 14,5 % entre el mayor y el menor de los cinco casos evaluados.

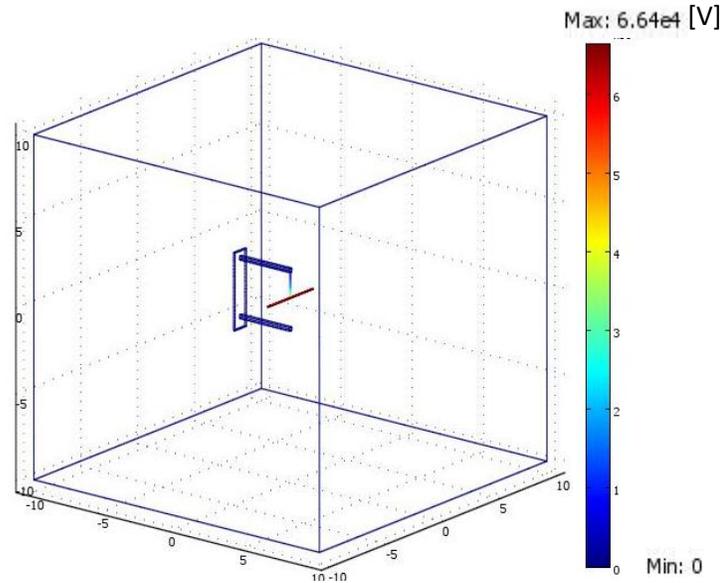


Figura 4.44. Modelo geométrico establecido de sección de poste 1210SMP de 115 kV con fronteras externas de 20 metros (distribución de potencial).

La Figura 4.45 muestra el comportamiento del campo eléctrico a lo largo del centro de la cadena de aisladores de 115 kV y en una sección del aire hasta alcanzar el brazo inferior del poste 1210SMP. Se observa dentro de los resultados que, conforme disminuyen las dimensiones del cubo que define las fronteras externas del modelo geométrico, el valor del campo eléctrico aumenta y se presentan variaciones en la distribución del potencial. Esto es consecuencia de que el campo eléctrico es inversamente proporcional a la distancia con respecto a la carga eléctrica y las capacitancias en el modelo se ven modificadas.

En los resultados de la Figura 4.45 se observa que aproximadamente en el punto 1,5 del eje horizontal, correspondiente a la unión entre la fuente de excitación y el aislamiento, el campo eléctrico presenta un valor entre 300,0 y 320,0 kV/m aproximadamente una variación del 6%.

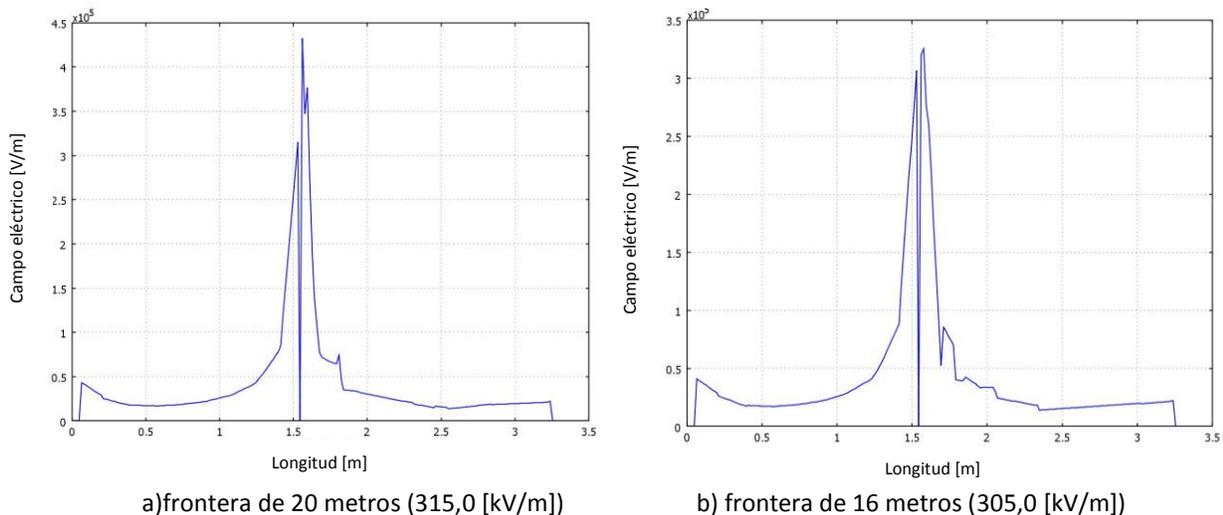


Figura 4.45. Campo eléctrico en modelo establecido de cadena de aisladores de 115 kV con cambios en dimensiones de fronteras externas.

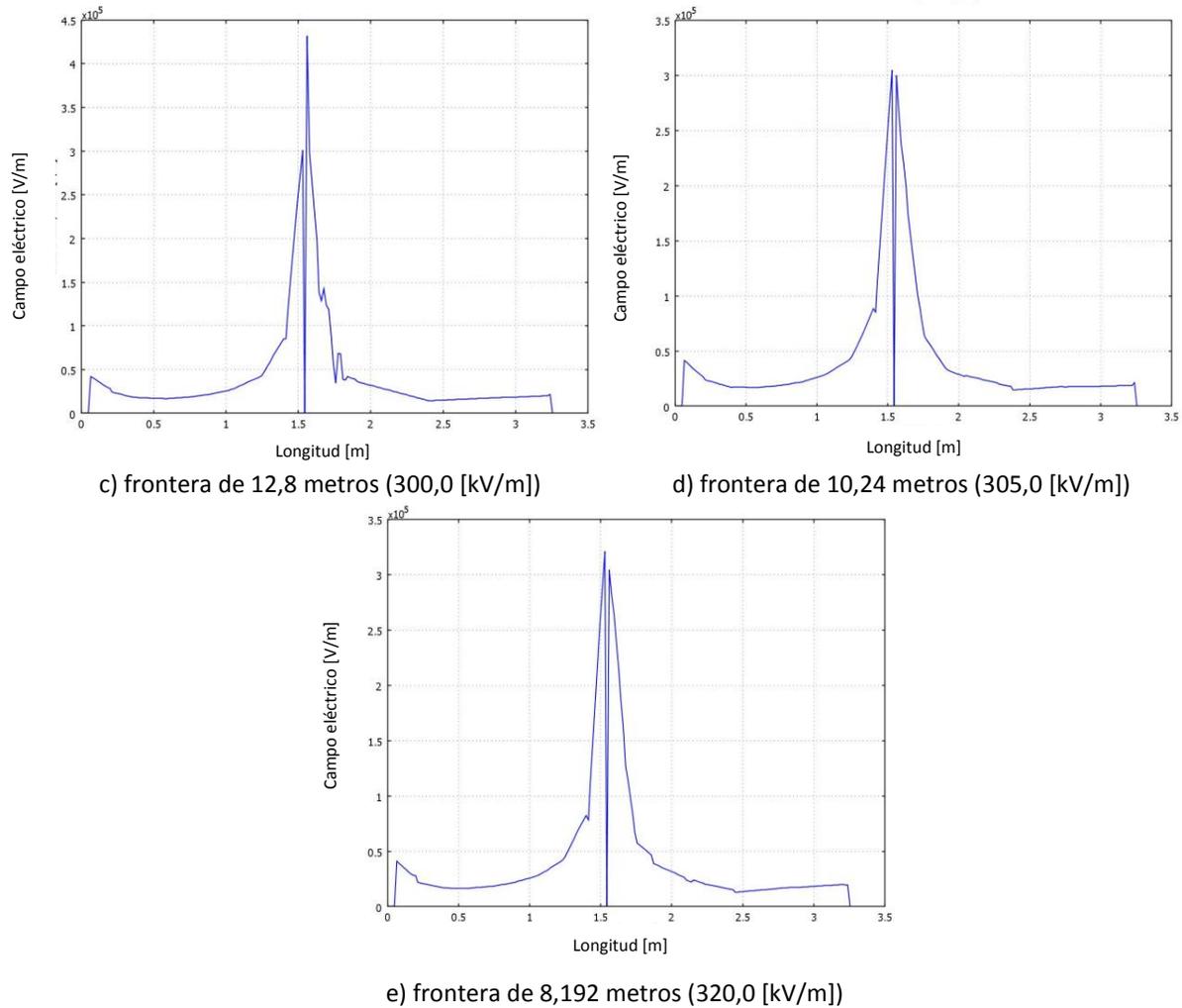


Figura 4.45. Campo eléctrico en modelo establecido de cadena de aisladores de 115 kV con cambios en dimensiones de fronteras externas. *Continuación.*

Los valores presentes del campo eléctrico en el aire cambian en la Figura 4.45 sobre un rango entre 300,0 y 430,0 kV/m aproximadamente, lo cual representa un cambio del 43%. Esto es resultado de los cambios en las dimensiones de las fronteras externas y la conformación de la malla de elementos finitos.

En el análisis del campo eléctrico y la distribución de potencial de las cadenas de aisladores ante el cambio de dimensiones de fronteras externas (Figura 4.45) se tiene que: a) los cambios en las dimensiones de las fronteras externas del modelo geométrico tridimensional influyen poco en el resultado del campo eléctrico en el elemento de estudio (cadena de aisladores); y b) los cambios en la conformación de la malla y el número de los elementos finitos son más importantes con respecto a la precisión de los resultados.

4.8. Resultados y análisis

La Tabla 4.2 sintetiza los resultados obtenidos para los casos de estudio que se manejan en relación al ángulo de balanceo en cadenas de aisladores. Es evidente que el cambio de posición de la fuente de excitación (cable conductor) con respecto a las estructuras influye en el comportamiento del campo eléctrico en la cadena de aisladores, ya que se modifican las capacitancias en los modelos geométricos al variar las distancias entre los elementos.

Tabla 4.2. Campo eléctrico en cadenas de aisladores ante diferentes estructuras y ángulos de balanceo.

Nivel de tensión [kV]	Tipo de estructura	Ángulo de balanceo [°]		
		0	15	30
		Campo eléctrico [kV/m]		
115	1210SMP	700,0	970,0	960,0
	E71A21	560,0	810,0	970,0
230	AS2	520,0	1320,0	1860,0
	2B2	1270,0	1670,0	1410,0
400	EA4A22MA	3800,0		

Para las estructuras de 115 kV, el valor el campo eléctrico para la cadena de aisladores en el poste troncocónico 1210SMP, sin cambio de posición debido al viento (0°), es de 700,0 kV/m. Un valor del campo eléctrico de 970,0 kV/m se presenta ante un ángulo de balanceo de 15°. Consecuentemente, la intensidad del campo eléctrico en la cadena se incrementa un 38,6%. Por otra parte, considerando la estructura tipo torre autosoportada E71A21 se observa un incremento de 560,0 kV/m a 970,0 kV/m en el campo eléctrico de la cadena de aisladores al presentarse un desplazamiento angular de 30° en la cadena, esto es un 73,2%, como resultado de la disminución de la distancia con respecto a la estructura. Los resultados obtenidos coinciden con [Izgi, 2008] y [Mehdi, 2010], respecto a un incremento del esfuerzo eléctrico en las cadenas de aisladores, cuando se presenta desplazamiento angular que acerca la cadena a la estructura. Mientras [Izgi, 2008] y [Mehdi, 2010] evalúan la distribución del potencial, en el presente trabajo se analiza la intensidad del campo eléctrico en la cadena que es una variable más fácil de asociar en relación a gradientes disruptivos.

Respecto a las estructuras de 230 kV, se tiene que el campo eléctrico a lo largo de la cadena de aisladores presenta un incremento del intensidad de 520,0 kV/m en el poste troncocónico AS2 en disposición vertical a un valor aproximado de 1860,0 kV/m ante un ángulo de balanceo de 30°, esto es un 357,7%. En la torre autosoportada 2B2 también se incrementa la intensidad del campo eléctrico en la cadena de aisladores debido a que las distancias con respecto

a la estructura se reducen. Consecuentemente, la intensidad del campo eléctrico en la cadena de aisladores de 1270,0 kV/m en condición de disposición vertical aumenta a 1670,0 kV/m cuando se encuentra bajo un ángulo de balanceo de 15°, esto es un 31,5%. Los resultados obtenidos coincide con [Mehdi, 2010] respecto a un aumento en los esfuerzos eléctricos en las cadenas. Las intensidades de campo eléctrico en estos casos comparadas con el umbral para inicio de corona (1500,0 kV/m) [Tanushri, 2010] son mayores. Consecuentemente, la implementación de anillos equipotenciales en cadenas de aisladores para 230 kV se recomienda como una opción para disminuir los esfuerzos del campo eléctrico.

El campo eléctrico máximo observado en la parte central de la cadena de aisladores de 400 kV en disposición en “V” es de 3800,0 kV/m y no se considera un desplazamiento transversal de las cadenas de aisladores debido a la propia configuración de la cadena. Se observa un valor de campo eléctrico mayor en las cadenas conforme se incrementa el nivel de tensión. Debido a que las cadenas de aisladores para 400 kV emplean 25 unidades, 50 en total si el conjunto de aislamiento es disposición en “V”, se presentan dificultades para desarrollar modelos geométricos detallados aplicando el FEM. Se recomienda el uso de modelos simplificados de los aisladores en los cuales puedan incluirse elementos importantes como los anillos equipotenciales para determinar los esfuerzos eléctricos coincidiendo con [Zhao, 2000].

En relación al campo eléctrico y distribución de potencial asociados al caso de estudio donde se considera un aumento de dos veces la longitud del conductor, se observa que el campo eléctrico en la cadena de aisladores en suspensión se ve disminuido aproximadamente un 6%, considerando el poste troncocónico 1210SMP de 115 kV. La distribución del potencial y por consiguiente la eficiencia a lo largo de la cadena bajo este cambio es mejor con respecto al caso original acorde a lo observado en la Figura 4.42. Acorde al trabajo realizado por [Zhao, 2000] se encuentra que conforme aumenta la longitud del conductor la distribución de potencial en las cadenas de aisladores presenta un comportamiento más homogéneo y el campo eléctrico disminuye debido a que los esfuerzos eléctricos se distribuyen a lo largo su longitud, la estructura y los conductores adyacentes. Consecuentemente, se recomienda el desarrollo de modelos geométricos donde la longitud del conductor sea mínimo del doble de la cadena de aislamiento para que los valores de los esfuerzos eléctricos obtenidos sean menores.

5

CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

El análisis del campo eléctrico y la distribución del potencial eléctrico escalaren cadenas de aisladores, mediante la aplicación del método de los elementos finitos, permite conocer su comportamiento ante diversas configuraciones físicas de la cadena en relación a su posición con respecto a la estructura que la sostiene y bajo diversas condiciones de operación.

Dentro de los resultados obtenidos en este trabajo de tesis, se observa la influencia de la presencia de las estructuras de transmisión y el cable conductor en el campo eléctrico y la distribución de potencial, a lo largo de la cadena de aisladores y sus alrededores. Los esfuerzos eléctricos debidos a los campos eléctricos en las cadenas de aisladores cambian conforme se modifica su distancia respecto a la estructura. En este trabajo de tesis se consideran los desplazamientos causados por viento.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis coinciden con [Izgi, 2008] y [Mehdi, 2010], respecto a un incremento del esfuerzo eléctrico en las cadenas de aisladores, cuando se presenta desplazamiento angular que acerca la cadena a la estructura. Mientras [Izgi, 2008] y [Mehdi, 2010] evalúan la distribución del potencial, en el presente trabajo se analiza la intensidad del campo eléctrico en la cadena que es una variable más fácil de asociar en relación a gradientes disruptivos y aparición de fenómenos que afectan a los aislamientos en general como las descargas parciales. Adicionalmente, los resultados obtenidos permiten conocer las partes internas del aislador que presentan esfuerzos eléctricos mayores, siendo en el caso de las cadenas de aisladores el primer elemento de la cadena en la parte de interacción física entre el perno, el cemento y el esbozo.

De las diversas metodologías disponibles para determinar el ángulo de balanceo en cadenas de aisladores, se observa que los reportes [CIGRE 348, 2008] y [CIGRE 72,1992] son los más precisos, respecto a las variables y características del viento consideradas para la evaluación

del ángulo de balanceo. La NOM-SEDE-001-2005[2006] establece condiciones para la determinación de la presión de viento en las líneas de transmisión y sus elementos, sin embargo, el artículo 922-12 señala un ángulo de balanceo en las cadenas de aisladores de 30°. Por su parte la especificación CPTT-DDLT-001/02 de [CFE, 2009a] define siete hipótesis de carga a considerar en el diseño electromecánico de la línea de transmisión, siendo las hipótesis H3 “viento máximo” y H5 “Balanceo de cables”, como aplicables para determinar el ángulo de balanceo. Debido a que las Normas Oficiales Mexicanas tienen mayor injerencia respecto a las especificaciones internas de empresas. El análisis bajo la condición ángulo de balanceo de 30° en cadenas de aisladores aplica para la CFE, independientemente de otros valores que se determinen del uso de sus especificaciones internas y que sean aplicados ante condiciones operativas particulares de un proyecto específico.

Una restricción importante en el análisis del campo eléctrico en las cadenas de aisladores mediante el FEM es que, desarrollar modelos geométricos tridimensionales detallados, requiere de equipos de cómputo con importantes capacidades de procesamiento. De tal forma que, la simplificación de los modelos geométricos numéricos y la aplicación de otros métodos numéricos como por ejemplo el BEM [Que, 2002; Zhao, 2000] resultan ser recomendables, debido a su característica de menor complejidad en la definición del modelo, aunque se incrementa el tiempo de solución computacional.

5.2. Trabajos futuros

El presente trabajo implicó el desarrollo de modelos detallados de las cadenas de aisladores de vidrio para los principales niveles de tensión (115, 230 y 400 kV), las cuales interactúan eléctricamente con las estructuras, conductores y herrajes considerados. Como parte de las consideraciones que no se evaluaron en este trabajo, y por lo tanto pueden ser materia de trabajo futuro, se encuentran: a) el desarrollo de modelos completos de las estructuras de transmisión para realizar el análisis del campo eléctrico, y b) el potencial en las cadenas de aisladores ante la presencia de más de una fuente de energía (las otras fases del circuito) y/o otras líneas eléctricas.

Un trabajo futuro involucra el desarrollo de modelos completos para las líneas de transmisión trifásicas de uno y dos circuitos para diversos niveles de tensión, con la finalidad de evaluar y analizar el comportamiento de los campos eléctricos y potenciales en las cadenas de aisladores ante la presencia de las otras fases de la línea.

El desarrollo de modelos de cadenas de aisladores estándar de porcelana y sintéticas no forma parte del presente trabajo. Consecuentemente, se pretende en el futuro desarrollar un análisis de campo eléctrico y distribución del potencial en este tipo de aislamientos para líneas de transmisión considerando su afectación por el fenómeno del viento.

La presencia de líneas de transmisión de alto voltaje en corriente directa (HVDC), existentes en varias partes del mundo, ofrece también un área de análisis del comportamiento del campo eléctrico en sus aislamientos, aplicando el FEM ante diversos fenómenos, como por ejemplo el ángulo de balanceo.

La consideración de diversos fenómenos para mejorar la distribución de potencial y el campo eléctrico en cadenas de aisladores ofrecen nuevos retos de análisis, éstos pueden ser: a) la graduación de la capacitancia; b) el vidriado superficial de las cadenas de aisladores y c) el uso de anillos equipotenciales.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANSI C29.2. *American National Standard for Insulators—Wet-Process Porcelain and Toughened Glass—Suspension Type*. American National Standards Institute. R1999.
2. ANSI C29.1. *American National Standard for Electrical Power Insulators—Test Methods*. American National Standards Institute. R2002.
3. ANSYS/Emag. <http://www.ansys.com/>. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2012.
4. Asenjo, E., Morales, N., and Valdenegro, A. *Solution of low frequency complex fields in polluted insulators by means of the Finite Element Method*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 1, pp. 10-16, February 1997.
5. Binns, K.J., Lawrenson, P.J., Trowbridge, C.W. *The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields*. John Wiley & Sons Ltd. 1992. ISBN: 978-0471-92460-9.
6. Bondeson, A., Rylander, T., and Ingelstrom, P. *Computational Electromagnetics*. Springer. USA. 2005. ISBN: 978-0387-26158-4.
7. CFE. *Especificación CFE L0000-02. Tensiones de sistemas de distribución, subtransmisión y transmisión*. Comisión Federal de Electricidad. México. Junio 1985.
8. CFE. *Plano de diseño cuerpo básico. 2B2*. Torres Mexicanas S.A. de C.V. Feb/87. Comisión Federal de Electricidad. México. Febrero 1987.
9. CFE. *Especificación CFE L0000-06. Coordinación de aislamiento*. Comisión Federal de Electricidad. Julio 1991.
10. CFE. *Especificación CFE L0000-41. Guía de aplicación de la especificación de coordinación de aislamiento*. Comisión Federal de Electricidad. México. Febrero 1995.
11. CFE. *Plano de diseño y montaje poste. AS2*. Tomexsa. MAR/99. Comisión Federal de Electricidad. México. Marzo 1999.
12. CFE. *Plano de cuerpo básico y diseño. Torre E71A21*. MAY/00. Comisión Federal de Electricidad. México. Mayo 2000.
13. CFE. *Plano de diseño. Torre tipo EA4A22MA*. OCT/01. Comisión Federal de Electricidad. México. Octubre 2001.
14. CFE. *Fallas en líneas de transmisión, estadísticas y eventos relevantes*. Coordinación de Transmisión y Transformación. Comisión Federal de Electricidad. México. 2002.
15. CFE. *NRF-018-CFE. Aisladores tipo suspensión de porcelana o de vidrio templado*. Comisión Federal de Electricidad. México. 2004a.
16. CFE. *Poste normalizado tipo 1210SMP*. 09/03/04. Comisión Federal de Electricidad. México. Marzo 2004b.

17. CFE. *Especificación J1000-50.Torres para líneas de subtransmisión y transmisión*. Comisión Federal de Electricidad. Enero 2006.
18. CFE. *Especificación J6100-54.Postesmetálicos para líneas de transmisión y subtransmisión*. Comisión Federal de Electricidad. Abril 2008.
19. CFE. *Especificación para diseño de líneas de transmisión aéreas*. CPTT-DDLT-001/02. Comisión Federal de Electricidad. México. Junio 2009a.
20. CFE. *Taller de PLS-CADD*. Minuta de conclusiones. Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación. 25 al 27 de noviembre de 2009. Comisión Federal de Electricidad. México, D.F. 2009b.
21. Comsol Multiphysics. <http://www.comsol.com/>. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2012.
22. Coulomb. <http://www.integratedsoft.com/>. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2012.
23. CIGRE 72. *Guidelines for the Evaluation of the Dielectric Strength of External Insulation*. Working Group 07 of Study Committee 33. Conseil International des Grands Réseaux Électriques. 1992.
24. CIGRE 348. *Tower Top Geometry and Mid Span Clearances*. Working Group B2.06. Conseil International des Grands Réseaux Électriques. June 2008.
25. Chakravorti, S., and Steinbigler, H. *Boundary-element studies on insulator shape and electric field around HV insulators with or without pollution*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 2, April 2000, pp 169-176.
26. Edison Electric Institute. *EHV Transmission Line Reference Book*. General Electric Company. 1968.
27. EN 50341-1. *Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV – Part 1: General requirements – common specifications*. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). June 2009
28. EN 50341-3-4. *Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV – Part 3: National Normative Aspects (NNA)*. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). 2011-01.
29. EPRI. *Transmission Line Reference Book. 345 kV and Above, 2nd Edition*. Electric Power Research Institute, 1982.
30. EPRI. *EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above, 3rd Edition*. Electric Power Research Institute, December 2005.
31. Espino-Cortes, F.P. y Ramírez Vázquez, I. *Uso de materiales con conductividad no-lineal para atenuar la intensidad del campo eléctrico en aisladores no-cerámicos*. IEEE Sección México. Reunión de Verano de Potencia. RVP-AI/2009-TRA-14-P225. Acapulco, Gro. 5-11 julio 2009.
32. Feser, K., and Pfaff, W. *A Potential Free Spherical Sensor for the Measurement of Transient Electric Fields*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-103, No. 10, October 1984. pp 2904-2911.

33. Fink, D.G., y Beaty, H.W. *Manual de Ingeniería Eléctrica, Tomo I. Decimotercera Edición*. McGraw-Hill. México. 1996. ISBN: 970-10-0872-3.
34. Flux3D. <http://www.cedrat.com/>. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2012.
35. GAMMA. *Distribución de potencial en cadenas de aisladores. Estudio teórico-experimental*. Boletín técnico No. 12 de 2005. GAMMA – Aisladores Corona. Colombia.
36. Guile, A. E. and Paterson, W. *Electrical Power Systems. Volume One. 2nd Edition in SI/Metric Units*. Pergamon International Library. UK. 1977. ISBN: 978-0080-21729-1.
37. Haddad, A., and Warne, D.F. *Advances in High Voltage Engineering*. The Institution of Electrical Engineers. UK. 2004. ISBN: 978-0852-96158-2.
38. Hewitt, P. *Física Conceptual. Segunda Edición*. Addison-Wesley Iberoamericana S.A. USA. 1995. ISBN: 0-201-62595-4.
39. Hileman, Andrew R. *Insulation Coordination for Power Systems*. Marcel Dekker, Inc. USA. 1999. ISBN: 0-8247-9957-7.
40. Houle, S.; Ghannoum, E.; Hardy, C. *Static and dynamic testing of transmission lines subjected to real wind conditions*. CIGRE Symposium: Compact overhead transmission lines. Leningrad 1991, Report 2000-2.
41. Hyatt, W.H., and Buck, J. *Engineering Electromagnetics*. Sixth Edition. McGraw-Hill. 2001. ISBN: 978-0071-20229-9.
42. IEC Std. 60071-1. *Insulation co-ordination – Part 1 Definitions, Principles, and Rules*. Seventh Edition. International Electrotechnical Commission. 1993.
43. IEC Std. 60071-2. *Insulation co-ordination – Part 2 Application Guide*. Third Edition. International Electrotechnical Commission. 1996.
44. IEC Std. 60826. *Design criteria of overhead transmission lines*. Ed. 3.0. International Electrotechnical Commission. 2003.
45. IEEE Std. 1313.1-1996. *IEEE Standard for Insulation Coordination – Definitions, Principles, and Rules*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1996.
46. IEEE Std. 1313.2-1999. *IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1999.
47. IEEE Taskforce on Electrical Fields and Composite Insulators. *Electric Fields on AC Composite Transmission Line Insulators*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, April 2008. Pages 823-830.
48. Ilhan, S. and Ozdemir, A. *Effects of corona ring design on the electric field intensity and potential distribution along an insulator string*. ELECO 2007, 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering. 5-12 December 2007, Bursa, Turkey. 2007.
49. Izgi, E., Inan, A., and Ay, S. *The Analysis and Simulation of Voltage Distribution over String Insulators using Matlab/Simulink*. Electric Power Components and Systems, 36:2, 109 – 123.

2008.

50. Khalifa, M. *High-Voltage Engineering. Theory and Practice*. Marcel Dekker, Inc. 1990. ISBN: 978-0824-78128-6.
51. Kiessling, F., Nefzger, P., Nolasco, J.P., and Kaintzyk, U. *Overhead Power Lines. Planning, Design, Construction*. Springer-Verlag. 2003. ISBN: 978-3540-00297-0.
52. Kontargyri V.T., Gonos I.F., Ilia N.C., Stathopoulos I.A. *Simulation of the electric field on composite insulators using the finite elements method*. WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Issue 5, Vol. 3, July 2004, pp. 1318-1322.2004a.
53. Kontargyri V.T., Gonos I.F., Ilia N.C., Stathopoulos I.A. *Electric Field and Voltage Distribution along Insulators under Pollution Conditions*. Proceedings of the 4th Mediterranean IEE Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (Med Power 2004), Lemesos, Cyprus, November 15-17, 2004. 2004b.
54. Kontargyri V.T., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., Michaelides A.M. *Measurement and verification of the voltage distribution on high voltage insulators*. Proceedings of the 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2006), Miami, Florida, USA, April 30 – May 3, 2006. 2006a.
55. Kontargyri V.T., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., Michaelides A.M. *Simulation of the electric field on high voltage insulators using finite element method*. Proceedings of the 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2006), Miami, Florida, USA, April 30 – May 3, 2006. 2006b.
56. Kontargyri V.T., Plati L.N., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., Michaelides A.M. *Measurement and simulation of the voltage distribution on an insulator string*. Proceedings of the 15th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2007), Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007, (T1-272).
57. Kontargyri V.T., Plati L.N., Gonos I.F., Stathopoulos I.A. *Measurement and simulation of the voltage distribution and the electric field on a glass insulator string*. Measurement, Vol. 41, Issue 5, pp. 471-480. 2008.
58. Leibfried, W.; Mors, H. VersuchsanlageHornisgrinde. Schlussbericht, Badenwerk AG, Karlsruhe. 1964.
59. Marungsri, B., and Onchantuek, W. *Simulation of Electric Field and Potential Distributions on Silicone Rubber Polymer Insulators under Contamination Conditions Using Finite Element Method*. WSEAS Transactions on Power Systems, Issue 9, Volume 3, September 2008. Pages 608-621.
60. Matlab. <http://www.mathworks.com/products/pde/>. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2012.
61. Maxwell.<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electromagnetics/Electromechanical+Design/ANSYS+Maxwell>. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2012.
62. Mehdi Ashouri, Mohammad Mirzaie & Ahman Gholami. *Calculation of voltage distribution*

- along porcelain suspension insulators based on finite element method.* Electric Power Components and Systems. 38:7, 820-831. UK. 2010.
63. NGK Insulators, Ltd., *List of Drawings*, 14-Jun-07.Junio2007.
 64. NMX-J-150/1. *Coordinación de aislamiento – Parte 1 Definiciones, Principios y Reglas.* Norma Mexicana. Asociación Nacional de Normalización y Certificación del Sector Eléctrico (ANCE), 1997.
 65. NMX-J-098.*Sistemas Eléctricos de Potencia – Suministro – Tensiones Eléctricas Normalizadas.* Norma Mexicana. Asociación Nacional de Normalización y Certificación del Sector Eléctrico (ANCE), 1999.
 66. NMX-J-150/2. *Coordinación de aislamiento – Parte 2Guía de aplicación.* Norma Mexicana. Asociación Nacional de Normalización y Certificación del Sector Eléctrico (ANCE), 2004.
 67. NOM-001-SEDE-2005. *Instalaciones Eléctricas (utilización).* Secretaria de Energía. Diario Oficial de la Federación, México. Lunes 13 de marzo de 2006.
 68. Onchantuek, W. and Marungsri, B. *Comparison of Electric Field and Potential Distribution on Silicone Rubber Polymer Insulators under clean and various Contamination Conditions using Finite Element Method.* WSEAS Transactions on Power Systems, Issue 2, Volume 4, February 2009.
 69. Opera. <http://www.cobham.com/>. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2012.
 70. PLS-CADD. <http://www.powline.com/>. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2012.
 71. Que, W. *Electric Field and Voltage Distributions along Non-Ceramic Insulators.* Ph. Degree Theses. The Ohio State University. USA. 2002.
 72. Quickfield. <http://quickfield.com/>. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2012.
 73. Rasolonjanahary, J.L. et al. *Computation of Electric Fields and Potential on Polluted Insulators using a Boundary Element Method.* IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 28, No. 2. 1992. pp. 1473-1476.
 74. Schumann, U., Barcikowski, F., Schreiber, M., and Karner, H.C. *FEM Calculation and Measurement of the Electric Field Distribution of HV Composite Insulator Arrangements.* 39th CIGRE Session, Paris, France, 25-30 August, 2002.
 75. Still, Alfred. *Electric Power Transmission. Third Edition, Seventh Impression.* McGraw-Hill Book Company, Inc. USA. 1927. ISBN: 978-1271-54229-1.
 76. SubbaR., and Udaya Kumar. *Enhancement of surface flashover performance of high voltage ceramic disc insulators.* Journal of Materials Engineering and Performance. Volume 20. February 2011. JMEPEG (2011) 20:24-30. pp. 24-30. ASM International.
 77. Tanushri Doshi. *Performance Analysis of Composite Insulators up to 1200 kV AC using Electric Field Calculations.* Master of Science Thesis. Arizona State University. USA. December 2010.

78. Zhao, T., and Comber, G. *Calculation of Electric Field and Potential Distribution along Nonceramic Insulators Considering the Effects of Conductors and Transmission Towers*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000. pp. 313-318.
79. Zhou, P.B. *Numerical Analysis of Electromagnetic Fields*. Springer-Verlag. Berlin. 1993. ISBN: 0-387-54722-3.
80. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., and Zhu, J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Sixth edition. Elsevier Butterworth-Heinemann. UK. 2005. ISBN: 978-0750-66320-5.

APENDICE A

Las características del equipo de cómputo empleado para el desarrollo de los casos de estudio del presente trabajo son: Procesador Intel Core i3 a 2,13 GHz; Sistema de 64 bits; Memoria 4 GB RAM; Sistema operativo Windows 7 Home Premium. La Tabla A.1 muestra las características de los casos de estudio realizados en cadenas de aisladores mediante el FEM.

Tabla A.1. Características de los casos de estudio realizados en cadenas de aisladores mediante el FEM.

Caso de estudio		Número de elementos	Grados de libertad	Tiempo de solución [seg.]
Poste 1210SMP	0°	128794	171230	51,17
	15°	202361	268966	97,313
	30°	202000	268479	96,814
Torre E71A21	0°	208978	277816	99,216
	15°	336134	448265	227,011
	30°	336632	448923	227,323
Poste AS2	0°	112995	128856	84,084
	15°	114064	150187	58,157
	30°	113063	148901	71,261
Torre 2B2	0°	183292	243116	99,091
	15°	183696	243464	99,872
	30°	184179	244026	98,826
Torre EA4A22MA		33086	44064	7,862
Poste 1210SMP (conductor 4 metros)		127084	169029	49,312
Poste 1210SMP (frontera 20 metros)		4749	6494	0,593
Poste 1210SMP (frontera 16 metros)		4388	5993	0,5
Poste 1210SMP (frontera 12,8 metros)		4424	6057	0,499
Poste 1210SMP (frontera 10,24 metros)		4285	5897	0,437
Poste 1210SMP (frontera 8,192 metros)		4146	5739	0,452