

DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE EN AISLADORES DE SUSPENSIÓN
UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

Por

Jesús María Bedoya Arango

Tesis sometida en cumplimiento parcial
de los requisitos para el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

en

Ingeniería Eléctrica

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ
2005

Aprobado por:

Lionel R. Orama Exclusa, Ph.D.
Presidente del Comité Graduado

Fecha

Efraín O'Neill Carrillo, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Agustín A. Irizarry Rivera, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Isidoro Couvertier, Ph.D.
Director del Departamento de ECE

Fecha

José R. Arroyo Caraballo, Ph.D.
Representante de Estudios Graduados

Fecha

RESUMEN

En la tesis que aquí se presenta, hemos propuesto el uso del Método de Elemento Finito (FEM, por sus siglas en inglés) como herramienta para simular la distribución de voltajes en aisladores de suspensión. El propósito principal de la investigación es el de poder proponer cambios en el diseño de dichos aisladores, una vez sean creados y validados los modelos. En esta tesis usaremos un caso fundamental de aisladores de suspensión para poder hacer la introducción al tema de FEM.

Los aisladores de suspensión se utilizan en sistemas de potencia y energía para proporcionar aislamiento eléctrico y también como ayuda mecánica sosteniendo líneas de transmisión y distribución. Los aisladores de suspensión que están en servicio en líneas de potencia están expuestos a sobrevoltaje (surge), y abuso mecánico severo (tormentas), rayos y arcos eléctricos. Es conocido que la distribución de voltajes entre los aisladores de una cadena no es equitativa entre dichos aisladores. Más aún, se sabe que los aisladores más cercanos la torre (potencial de tierra) soportan menos magnitud de voltaje que aquellos que se encuentran más cerca de la línea. En esta tesis se demuestra que al realizar cambios en la geometría de una cadena de aisladores pueden variar el valor de voltaje soportado por cada unidad de la cadena.

ABSTRACT

The use of the Finite Element Method (FEM) is presented in this work as a tool to simulate the distribution of voltages in suspension insulators. The main purpose of the work is to create and validate insulator models to propose changes in the design of such suspension insulators. A fundamental case of suspension insulators will be used to make the introduction to the FEM topic.

The suspension insulators are used in power and energy systems to provide electrical isolation and also as a mechanical aid to hold communication and distribution lines in place. The suspension insulators that are used in power lines are exposed to over-voltage, thermal tensions, and to their inherent natural aging. Not only an insulator must have enough mechanical resistance, but also it must be designed to withstand severe mechanical abuse like storms, rays and electric arcing. It is known that the voltage distribution within the chained elements that compose an insulator is not equitable among themselves. Even more, the insulators closer to the tower (having ground potential) can withstand less voltage magnitude than those closer to the line. It is demonstrated in this thesis that changes in the geometry of a chain of insulators can vary the voltage that every unit in the chain can withstand.

DEDICATORIA

A Dios por estar siempre conmigo, por haberme guiado e iluminado el camino y dado fuerzas para lograr mis sueños.

A mi madre, Isabel Arango (Q.E.P.D.), a mi padre, José Omar Bedoya, quien con muchos sacrificios ha luchado contra adversidades por sacarme hacia delante y hacerme una persona de bien.

A mis hermanos Fharide y Omar Andrés, por su incondicional apoyo y haber creído siempre en mi.

A mis queridos hijos: Ingrid Viviana, Juan David y Kevin Steven, “Quiero que siempre lleven presente la importancia de aprender y busquen el camino del conocimiento y el deber”, ¡Que Dios los bendiga!

AGRADECIMIENTOS

EL autor expresa su agradecimiento:

A mi director de tesis, Dr. Lionel Orama Exclusa, Ph.D., Catedrático Asociado Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computadoras, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez.

A los miembros de mi Comité Graduado: Dr. Efraín O'Neill Carrillo, Ph.D., Dr. Agustín A. Irizarry Rivera, Ph.D., y al Dr. José R. Arroyo Caraballo, Ph.D. por sus recomendaciones y valiosas sugerencias para un mejor desarrollo y presentación de esta tesis.

A La Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, por darme la oportunidad de continuar el proceso de enriquecimiento intelectual.

A todas las personas que de una u otra forma colaboraron en el desarrollo de este trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	II
ABSTRACT.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
TABLA DE CONTENIDO.....	VI
LISTA DE TABLAS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
1. INTRODUCCION.....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	8
1.3. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
1.4. SÍNTESIS DE ESTA TESIS.....	10
2. PUBLICACIONES PREVIAS.....	10
2.1. DESCRIPCIÓN.....	12
2.2. MÉTODO DE ZUMBIDO.....	12
2.3. MEDICIÓN O DETECCIÓN DE POTENCIAL.....	15
2.4. MEDICIÓN DE RESISTENCIA.....	16
2.5. MEDICIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO.....	17
2.6. SIMULACIÓN DE CARGA (CSM).....	19
2.7. ESTUDIO EN LA FORMA DEL CAMPO ELÉCTRICO Y MECANISMO DE DESCARGA DISRUPTIVA DE UN AISLADOR DE SUSPENSIÓN CONTAMINADO.....	21
2.7.1. <i>Modelo estimado y método</i>	24
2.8. MÉTODO DE LA DISRUPCIÓN.....	25
2.9. MÉTODO DE LAS SUSTANCIAS LUMINOSAS.....	26
2.10. MÉTODO DEL MEDIDOR ELECTRÓNICO.....	26
2.11. MÉTODO DEL PARARRAYOS.....	28
2.11.1. <i>Pararrayos en serie</i>	28
2.11.2. <i>Pararrayos en paralelo</i>	29
2.11.3. <i>Pararrayos en cada unidad</i>	30
2.12. MÉTODO DEL EXPLOSOR.....	31
3. METODO SELECCIONADO.....	32
3.1. ELEMENTO FINITO.....	32
3.2. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE VOLTAJES UTILIZANDO DOS AISLADORES.....	39
3.3. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE VOLTAJES UTILIZANDO CUATRO AISLADORES.....	46

4. SIMULACIÓN Y RESULTADOS.....	55
4.1. INTRODUCCIÓN.....	55
4.2. SELECCIÓN DEL PROGRAMA UTILIZADO.....	55
4.3. SIMULACIÓN EN EL ORDENADOR DE CASOS HECHOS A MANO USANDO EL PROGRAMA QUICK FIELD.....	56
4.4. SIMULACIÓN EN ATP PARA VALIDAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN QUICK FIELD.....	64
4.4.1. <i>Simulación con una fuente DC donde el voltaje no es equitativo.....</i>	64
4.4.2. <i>Simulación con una fuente AC donde el voltaje no es equitativo.....</i>	66
4.4.3. <i>Simulación con una fuente DC donde el voltaje es equitativo.....</i>	68
4.4.4. <i>Simulación con una fuente AC donde el voltaje es equitativo.....</i>	70
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	73
6. TRABAJOS FUTUROS.....	77
APENDICE A.....	79
A.1 INTRODUCCION.....	79
A.2 CÓMO SE CREA UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	79
A.3 ETAPAS PARA EL CÁLCULO CON ORDENADOR.....	80
A.4 CREACIÓN DE GEOMETRÍA Y ENTRADA DE DATOS.....	81
A.5 OBTENCIÓN DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ EN CADA ELEMENTO.....	82
A.6 OBTENCIÓN DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ GLOBAL.....	82
A.7 OBTENCIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS.....	82
A.8 OBTENCIÓN DE TENSIONES.....	83
A.9 ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	83
APENDICE B.....	84
REFERENCIAS.....	92
BIBLIOGRAFÍA.....	95

LISTA DE TABLAS

<i>Tablas</i>	<i>Pág.</i>
<i>Tabla 3.1 Valores de voltaje en los diferentes nodos donde el potencial no es conocido.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 3.2 Valores de voltaje del supernodo 2 y 3.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 3.3 Valores de voltaje encontrados en los diferentes arreglos, comparados con los deseados.....</i>	<i>53</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figuras</i>	<i>Pág.</i>
Figura 1.1. <i>Elementos de un aislador de suspensión.....</i>	2
Figura 1.2. <i>Circuito equivalente cadena seis aisladores.....</i>	4
Figura 1.3. <i>Conjunto de capacitancias de cuatro aisladores de suspensión.....</i>	6
Figura 2.1. <i>Probador de aisladores de suspensión [3].....</i>	18
Figura 2.2. <i>Vista del nuevo probador de aisladores [3].....</i>	18
Figura 2.3. <i>Descripción uso del nuevo probador de aisladores.....</i>	19
Figura 2.4. <i>Tres puntos de cargas en el vacío [21].....</i>	23
Figura 2.5. <i>Modelo de cálculo del aislador de suspensión XP-70 [20].....</i>	24
Figura 2.6. <i>Diagrama de bloques circuito electrónico [22].....</i>	27
Figura 2.7. <i>Montaje del pararrayos en serie [22].....</i>	29
Figura 2.8. <i>Montaje del pararrayos en paralelo [22].....</i>	30
Figura 2.9. <i>Montaje del pararrayos en cada unidad [22].....</i>	31
Figura 3.1. <i>Aislador en su forma física (a) y aislador ha utilizarse en el análisis manual (b).....</i>	33
Figura 3.2. <i>Distribución de los diferentes nodos usados para el análisis de FEM.....</i>	33
Figura 3.3. <i>Forma del triángulo (a) usado en el análisis manual de elemento finito (FEM), i, j y k nombres dados a los vértices, donde la impedancia entre cada vértice tiene valor de 1 por unidad, (b) división de triángulos hecha por el programa Quick Field.....</i>	35
Figura 3.4. <i>Valores de los nodos desconocidos con un arreglo de dos aisladores.....</i>	40
Figura 3.5. <i>Variación del largo del aislador inferior y valores de los nodos.....</i>	41
Figura 3.6. <i>Variación del largo del aislador superior y valores de los nodos.....</i>	42
Figura 3.7. <i>Variación del largo de ambos aisladores y valores de los nodos.....</i>	43
Figura 3.8. <i>Variación del ancho de ambos aisladores y valores de los nodos.....</i>	44
Figura 3.9. <i>Variación del largo de los dos primeros aisladores (de línea a ground).....</i>	47
Figura 3.10. <i>Variación del largo del primer y tercer aislador (de línea a ground).....</i>	48
Figura 3.11. <i>Variación del largo del primer y cuarto aislador (de línea a ground).....</i>	49
Figura 3.12. <i>Variación del largo del segundo y cuarto aislador (de línea a ground).....</i>	50
Figura 3.13. <i>Variación del largo del tercer y cuarto aislador (de línea a ground).....</i>	51
Figura 3.14. <i>Cadena de aisladores de cuatro unidades sin ninguna variación.....</i>	52
Figura 4.1. <i>Equivalencias del diseño de los aisladores.....</i>	56
Figura 4.2. <i>Resultado del voltaje en la unión de los dos aisladores.....</i>	57
Figura 4.3. <i>Voltaje en la unión de los aisladores variando el largo del aislador inferior.....</i>	59

Figura 4.4.	<i>Voltaje en la unión de los aisladores variando el largo del aislador superior.....</i>	60
Figura 4.5.	<i>Voltaje en la unión de los aisladores variando el largo de ambos aisladores.....</i>	61
Figura 4.6.	<i>Voltaje en la unión de los aisladores variando el ancho de ambos aisladores.....</i>	62
Figura 4.7.	<i>Voltaje en la unión de los aisladores variando el ancho del primer aislador y ancho y largo al segundo aislador.....</i>	63
Figura 4.8.	<i>Modelo de aisladores con fuente DC donde no hay distribución equitativa de voltajes.....</i>	65
Figura 4.9.	<i>Graficas de voltajes DC no equitativos.....</i>	66
Figura 4.10.	<i>Modelo de aisladores con fuente AC donde no hay distribución equitativa de voltajes.....</i>	67
Figura 4.11.	<i>Graficas de voltajes AC no equitativos.....</i>	68
Figura 4.12.	<i>Modelo de aisladores con fuente DC donde hay distribución equitativa de voltajes.....</i>	69
Figura 4.13.	<i>Graficas de voltajes DC equitativos.....</i>	70
Figura 4.14.	<i>Modelo de aisladores con fuente AC donde hay distribución equitativa de voltajes.....</i>	71
Figura 4.15.	<i>Graficas de voltajes AC equitativos.....</i>	72
Figura A.1.	<i>Esquema Proceso de Cálculo mediante ordenador.....</i>	81
Figura B.1.	<i>Valor de voltaje hallado manualmente donde se realizo más divisiones en el arreglo de la cadena.....</i>	85
Figura B.2.	<i>Variación del largo de los dos primeros aisladores (de línea a ground).....</i>	86
Figura B.3.	<i>Variación del largo del primer y tercer aislador (de línea a ground).....</i>	87
Figura B.4.	<i>Variación del largo del primer y cuarto aislador (de línea a ground).....</i>	88
Figura B.5.	<i>Variación del largo del segundo y cuarto aislador (de línea a ground).....</i>	89
Figura B.6.	<i>Variación del largo del tercer y cuarto aislador (de línea a ground).....</i>	90
Figura B.7.	<i>Cadena de aisladores de cuatro unidades sin ninguna variación.....</i>	91

Capítulo 1

Introducción

1.1 Justificación

Las extensas distancias a las que se transmite corriente eléctrica han aumentado junto con los niveles de voltaje de los sistemas. Esto ha conducido a un aumento significativo en el número de aisladores de suspensión que se deben usar en las líneas de transmisión de energía. Actualmente el problema de aumento en el nivel de voltaje y proveer un aislamiento adecuado a dichas líneas se soluciona colocando más aisladores en serie, sin que la distribución de voltaje en el arreglo de aisladores sea asunto primordial.

Una unidad aisladora de suspensión es un ensamble de una pieza de porcelana y herrajes metálicos, provista de medios de acoplamiento no rígidos, a otras unidades o herrajes terminales. Según la figura 1.1, en un aislador de suspensión típico se distinguen los siguientes elementos:

1. Esmalte
2. Arena cerámica
3. Cemento
4. Ojal o cuenca
5. Pintura bituminosa
6. Campana metálica
7. Cuerpo cerámico
8. Perno metálico (pasador o bola)

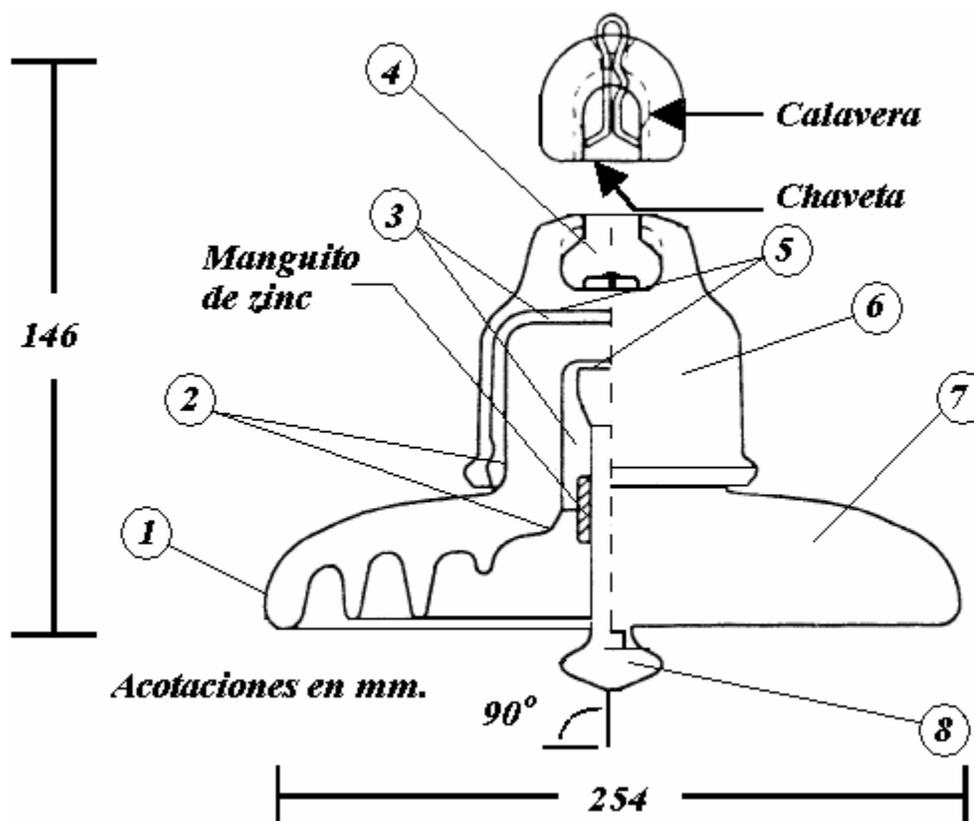


Figura 1.1. Elementos de un aislador de suspensión

Los aisladores de suspensión se utilizan muy extensamente en sistemas de energía para proporcionar aislamiento eléctrico y también como ayuda mecánica sosteniendo las líneas de transmisión de alto voltaje. Los aisladores de suspensión que están en servicio en líneas de transmisión de energía están expuestos a sobrevoltaje de conmutación (contactos entre líneas), a tensiones térmicas y por supuesto a un envejecimiento natural. Un aislador no sólo debe tener suficiente resistencia mecánica, sino que debe estar diseñado para soportar severo abuso mecánico, rayos y arcos eléctricos sin sufrir un daño permanente, estos son algunos de los efectos a los que se expone un aislador de suspensión.

La detección y sustitución de aisladores en mal estado en líneas de transmisión de energía es de suma importancia para la operación segura del

sistema. La presunción que el voltaje a través de la cadena de aisladores se comparta equitativamente entre los diferentes aisladores. En esta tesis, se analizará la veracidad de esta suposición, usando el Método de Elemento Finito (FEM por sus siglas en inglés). Por medio de FEM se observará la distribución de dichos voltajes, y se tratará de realizar una distribución de dichos voltajes en forma equitativa a lo largo de la cadena, ya sea en forma individual o en la disposición de aisladores que conforman la cadena. Los aisladores crean una red de capacitancias, las cuales podremos variar (esta variación se consigue modificando la geometría de los aisladores) para tratar de conseguir nuestro objetivo, se utilizará el programa de computadora QF (QuickField) para conocer el comportamiento de estos voltajes.

En una cadena de aisladores se manifiestan varios grupos de capacidades asociadas a las diferentes partes que la constituyen; tales son:

1. La capacitancia debida al dieléctrico (porcelana o vidrio), entre la cuenca (cavidad en que se aloja el perno metálico) y el perno metálico de cada unidad (C).
2. La capacitancia entre las partes metálicas (herrajes) y el terminal de tierra (torre), se debe principalmente al dieléctrico aire, siendo estas capacidades de dispersión (C_e).
3. La capacitancia entre cualquier elemento metálico de la cadena y todos los demás elementos metálicos de la misma (C_{pm}).
4. La capacitancia entre las partes metálicas (herrajes) y el conductor de fase (K).

La figura 1.2 muestra estos cuatro grupos de capacidades para una cadena de 6 aisladores. Nótese que para la capacidad entre partes metálicas C_{pm} , por simplicidad del dibujo, solo se representan las referidas a un aislador.

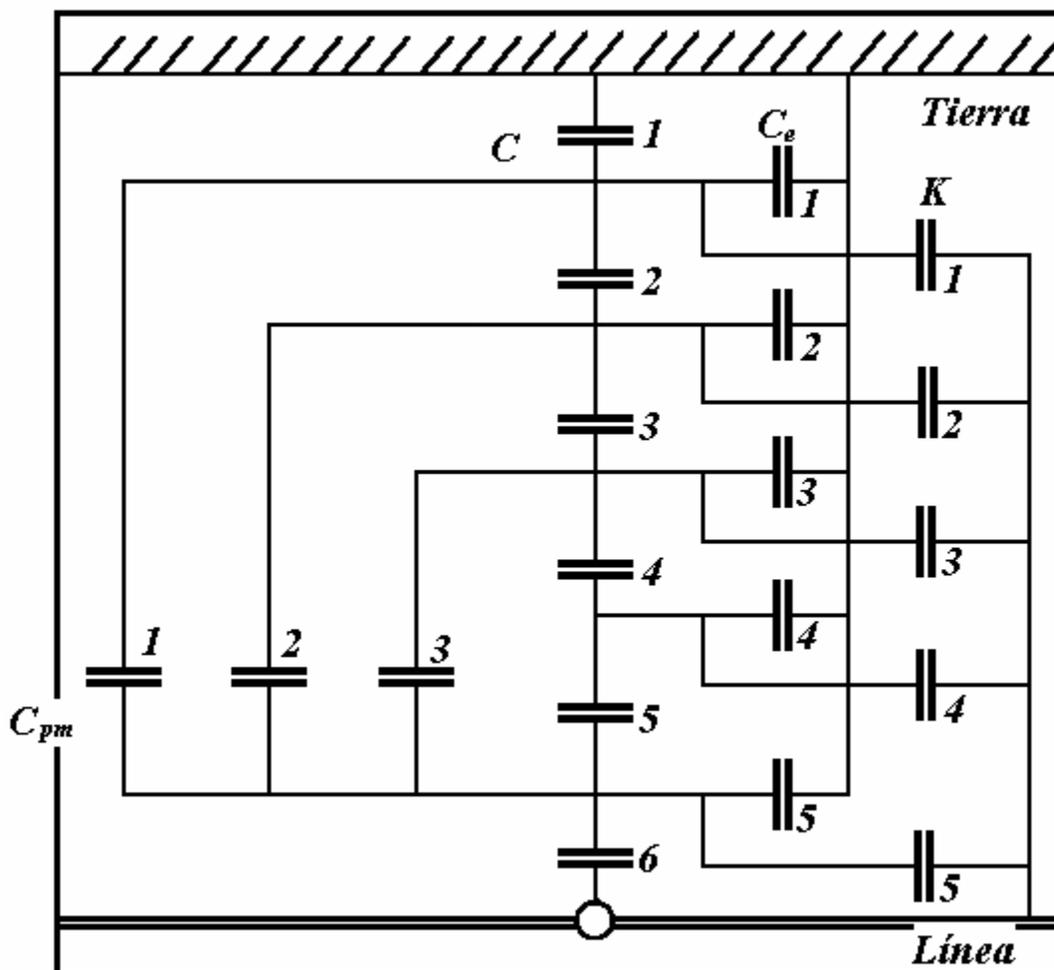


Figura 1.2. Circuito equivalente cadena de seis aisladores

La determinación exacta de C_{pm} es muy compleja y aunque estas capacitancias existen, su efecto no es muy notorio, por lo tanto puede descartarse en muchos casos [1]. Según las mediciones la capacidad K es muy pequeña comparada con C_e siendo siempre menor del 10% [2], con lo cual, al despreciarla, se simplifica mucho el circuito equivalente.

Prestaremos atención al reparto de potencial entre los distintos elementos de una cadena de aisladores de suspensión, observaremos que la tensión de contorneamiento (voltaje que se encuentra en el contorno del aislador) en seco de un aislador normal de 254 mm de diámetro es de 78kV. Sin embargo cuando se conforma una cadena de n elementos no se tiene una tensión de contorneamiento de $n \cdot 78$ kV, sino inferior. Por ejemplo:

- 5 elementos soportarían 270 kV (promedio de 54 kV)
- 10 elementos soportarían 475 kV (promedio 47.5 kV)
- 15 elementos soportarían 670 kV (promedio de 44.6 kV)

Esto se debe a la desigualdad en la distribución de potencial a lo largo de la cadena. Desde el punto de vista de las capacitancias, una cadena de aisladores es semejante al conjunto de condensadores conectados como se ve en la figura 2, para el supuesto de cuatro aisladores.

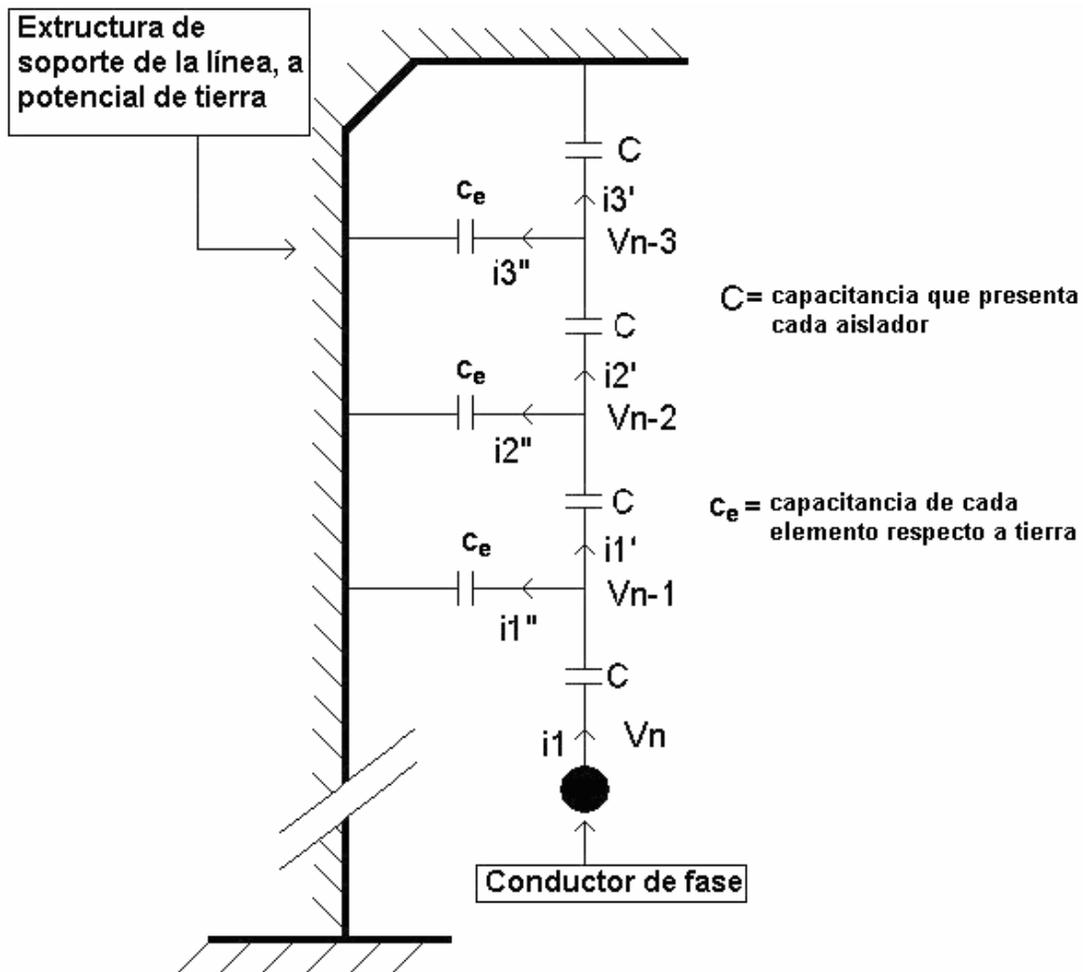


Figura 1.3. Conjunto de capacitancias de cuatro aisladores de suspensión

Como se concluye de la simple inspección de la figura 1.3, la corriente a través del condensador más próximo a la línea (el que se encuentra entre V_n y V_{n-1}) es mayor que la de todos los demás y se va reduciendo en cada uno de los aisladores, dependiendo del lugar en que se ubiquen. Lo mismo ocurre con la diferencia de potencial sufrida entre los aisladores y cuya expresión es:

$$V = ZI \quad ; \quad V = \frac{I}{j\omega C} \quad \text{es decir} \quad Z = \frac{-j}{\omega C}$$

Donde:

i : Corriente capacitiva.

C : Capacitancia que presenta cada aislador.

ω : Frecuencia natural, $(2\pi f)$.

c : Capacitancia de cada elemento respecto a tierra.

V_n : Potencial de la línea con respecto a tierra.

V_{n-1} : Potencial en la unión de los dos últimos elementos.

Puesto que las corrientes de capacidad están en fase entre sí (adelantadas $\pi/2$ sobre las tensiones) se tiene:

$$\begin{aligned} i_1 &= i'_1 + i''_1 \\ i'_1 &= i'_2 + i''_2 \\ i'_2 &= i'_3 + i''_3 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Como en general se verifica que $I = \omega CV$, el sistema anterior se transforma como sigue:

$$\begin{aligned} \omega C(V_n - V_{n-1}) &= \omega C(V_{n-1} - V_{n-2}) + \omega c V_{n-1} \\ \omega C(V_{n-1} - V_{n-2}) &= \omega C(V_{n-2} - V_{n-3}) + \omega c V_{n-2} \\ \omega C(V_{n-2} - V_{n-3}) &= \omega C(V_{n-3} - V_{n-4}) + \omega c V_{n-3} \end{aligned} \tag{1.2}$$

Dividiendo por ωC y haciendo $K = c/C$ obtenemos:

$$\begin{aligned} V_n - V_{n-1} &= V_{n-1} - V_{n-2} + KV_{n-1} \\ V_{n-1} - V_{n-2} &= V_{n-2} - V_{n-3} + KV_{n-2} \\ V_{n-2} - V_{n-3} &= V_{n-3} - V_{n-4} + KV_{n-3} \end{aligned} \quad 1.3$$

De ahí resulta el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} V_n &= (2 + K)V_{n-1} - V_{n-2} \\ V_{n-1} &= (2 + K)V_{n-2} - V_{n-3} \\ V_{n-2} &= (2 + K)V_{n-3} - V_{n-4} \end{aligned} \quad 1.4$$

El tema principal de nuestra investigación, actualmente no ha sido muy diseminado técnicamente. Esto hace que los datos disponibles para evaluar este proyecto de investigación sean limitados.

1.2. Objetivos

El propósito de la investigación aquí planteada es realizar la simulación y análisis de la distribución de voltajes que se presenta en aisladores de suspensión.

La motivación para realizar este trabajo de investigación es que en el momento de realizarlo no existe en la literatura evidencia alguna de geometrías variadas en aisladores de distribución, de forma tal que se consiga una distribución equitativa de los voltajes en la cadena, la importancia radica en el

cambio que se realiza en la geometría el cual redundaría en un cambio de voltaje aplicado a cada aislador, por lo tanto tendríamos una vida útil mayor de los aisladores pues sus voltajes serían muy similares, esta es la contribución principal que se espera en esta tesis.

En los últimos años, algunos investigadores han comenzado a estudiar la relación entre la distribución del campo eléctrico a lo largo de la superficie del aislador y del desarrollo de arcos locales. El propósito de dichas investigaciones es clarificar el mecanismo de descarga disruptiva en un determinado punto, ofreciéndonos una visión de la esencia física del fenómeno.

Nuestros objetivos específicos son:

1. Modelar y simular los voltajes resultantes de la interacción del conductor y tierra (en este caso la torre que los sustenta). Deseamos obtener simulaciones que produzcan resultados consistentes con los valores obtenidos de forma manual, donde se aprecia un cambio entre los valores de voltaje a través de los discos individuales en el arreglo de aisladores.
2. Modelar diferencias en las geometrías de los aisladores de suspensión con el propósito de equalizar la distribución de voltaje entre los mismos.
3. Comparar nuestros diseños con aisladores disponibles en el mercado.
4. Comparar el método de elementos finitos con algunos métodos propuestos hasta ahora para la detección de campo eléctrico en aisladores de suspensión.

Del análisis es posible que se desprendan recomendaciones que redundarán en cambios físicos o de diseño. Esto conlleva a un mejor desempeño y eficiencia de operación.

1.3 Método de la investigación

El método a seguir consiste, primero en validar los cálculos manuales con un programa de computador, haciendo una comparación con los diferentes ejemplos mostrados. Segundo, trabajar con una cadena de aisladores (hasta 4 de ellos, se trabaja a 38kV) donde se mostrará la distribución de voltaje a través de cada aislador. Mediante el programa de computador tomaremos los valores de capacitancia de dicha cadena, para usarlos en otro programa ATP (Alternative Transient Program). ATP se usará para validar los valores de voltaje anteriormente encontrados. Todo esto es con el fin de tener una herramienta que nos de la distribución de potencial en la cadena. De esa forma cuando ingresemos los valores de voltaje que perseguimos, tendremos la certeza de que los valores arrojados por el programa elegido se aproximen a la realidad.

1.4 Síntesis de esta tesis

Esta tesis en su primer capítulo muestra una introducción acerca de los aisladores de suspensión, donde se explica algunas características de éstos en una cadena de aisladores (reparto de corrientes), se plantean objetivos a los que se quiere llegar y el método que se elige para la investigación.

El capítulo dos consiste en la revisión de trabajos realizados acerca de la distribución de voltaje en aisladores y se explican algunos métodos de detección.

El capítulo tres describe el método de elemento finito como herramienta para realizar nuestro análisis.

En el capítulo cuatro se realizan las simulaciones y comparaciones de cálculos teóricos con cálculos hechos por un programa de computador.

Finalmente, la obtención de resultados con las características que deseamos para nuestro análisis, conclusiones y algunas recomendaciones que puedan derivarse de dicho análisis se presenta en el capítulo cinco.

Capítulo 2

Publicaciones previas

2.1 Descripción

En años anteriores, se han utilizado muchos métodos para la detección de fallas en aisladores, estos métodos han tenido ventajas y desventajas, pero hasta el momento no existe un método eficaz para saber en realidad como distribuir equitativamente el voltaje entre los discos de una cadena de aisladores.

La siguiente es una revisión de la literatura en el análisis de aisladores de suspensión. Se mostraran algunos de los métodos existentes para la detección de fallas en aisladores de suspensión, los cuales están enfocados en conocer las fallas, pero no tratan de cómo se distribuye el voltaje entre los aisladores. A continuación veremos los trabajos hechos y algunos métodos utilizados en el campo de la detección de las fallas en los aisladores.

2.2 Método de zumbido

El método de zumbido [3] se ha utilizado comúnmente. Él mismo no se considera como un método elegante pero ha demostrado ser muy útil especialmente para las secuencias largas de aisladores. Este método es basado en el principio de chispeo que se produce cuando dos porciones metálicas con diversos potenciales son cortocircuitadas. El método, básicamente, consiste en aplicar un cortocircuito a cada aislador de una cadena de aisladores y escuchar dicho zumbido (los aisladores en perfecto estado tienen un zumbido muy particular, que se conoce por experiencia previa). De otro lado, se debe tener en cuenta las consideraciones de seguridad que imposibilitan hacer los

cortocircuitos de aisladores y de otras desventajas que se derivan al realizar este método.

Se necesitan dos pasos para realizar la prueba del método de zumbido a una cadena de aisladores:

1. Se debe estimar el potencial a lo largo de la cadena de aisladores. Esto se consigue tocando primero el conductor vivo solamente con un terminal del dispositivo de medición (voltímetro) para establecer así un nivel de sonido de corona. Las corrientes oscilantes del más variado rango y diversas formas de onda, incluso las pulsantes y de radio frecuencia, de alta tensión generan luminiscencia alrededor de los cuerpos que se interponen en su camino. Estas luminosidades, generalmente de color azul violáceo con algún tinte rojizo, aparecen como halos o coronas circundando a dicho objeto y es por eso que se le denomina "Efecto Corona". En las inmediaciones de las líneas de alta tensión, este efecto se puede percibir como un ruido (perfectamente audible), semejante al "zumbido de abejas", cuya intensidad será mayor cuanto más tensión soporten los conductores. Se trata de un fenómeno esencialmente eléctrico. Este nivel de sonido de corona se toma como referencia. Después de realizado esto, el terminal es aplicado contra algunos puntos de los aisladores a lo largo de la cadena mientras se escucha el nivel de sonido que es producido en cada una de las posiciones que se han medido. Se hace necesario hacerlo para estar seguro de que existen bastantes aisladores en buen estado (se refiere a sus características como aislador) en la cadena. Esto es verificado por una disminución en el ruido resultante de esta prueba mientras es movido el instrumento desde el conductor vivo hasta el extremo que esta puesto a tierra en la cadena. Cuando se tiene niveles altos de ruido de la misma intensidad en dos lugares contiguos en la cadena de aisladores esto es interpretado como aislamiento restante escaso (poco aislamiento). En tal caso el paso dos a

continuación no se realiza, pues se corre el riesgo de causar una descarga disruptiva poniendo en cortocircuito un aislador adicional.

2. Los aisladores dispuestos a lo largo de la cadena se cortocircuitan sucesivamente colocando un puente sobre cada uno de ellos con dos electrodos metálicos en forma de "U" (un extremo va en donde se aloja el perno metálico y el otro en dicho perno, hay que tener en cuenta que estos dos no están en contacto directo por lo tanto no hay conducción de ningún tipo). Mientras, se escucha el sonido producido por el arco o corona. Un aislador internamente puesto en cortocircuito (cuando el alojamiento del perno metálico y el perno metálico están en contacto) no producirá ningún sonido debido a que no tiene ningún voltaje a través de él.

Para realizar el paso dos, un terminal del electrodo de prueba bifurcado se coloca en contacto con un punto del primer aislador que está unido a la estructura de soporte mientras que el otro terminal es colocado en un punto del segundo aislador. Si al realizar esto se produce un zumbido, el aislador tiene a través de él un voltaje, este aislador estaría en buena condición. La prueba se realiza en forma continua moviendo el electrodo del medidor de un aislador a otro y escuchando si hay zumbido o carencia de éste. Los resultados de esta prueba de zumbido se deben registrar manualmente y se debe tener muy en cuenta el haber contado correctamente los aisladores.

Basándose en el método anteriormente descrito, se ha desarrollado un probador de aisladores [3] el cual se basa en la medición y posterior registro (se hace en forma automática) del campo eléctrico a lo largo de la secuencia de aisladores de la cadena. Dicho campo eléctrico disminuye considerablemente delante de un aislador interno, puesto en cortocircuito. La forma de trabajar de este dispositivo es deslizarlo a lo largo de la cadena de aisladores mientras son contados automáticamente. La información que se obtenga en la prueba puede

ser almacenada y luego ser transferida a un ordenador, para almacenamiento e interpretación de los datos obtenidos. Este probador también da otra información, y es que la distribución del voltaje a lo largo de las cadenas de aisladores, puede ser muy útil para el diseño de líneas de transmisión de energía.

Existen otros métodos muy utilizados para realizar la detección de fallas en aisladores de suspensión, algunos son activos (cuando una fuente externa de alto voltaje es aplicada al aislador para probarlo realmente y llevarlo a sus límites extremos) y otros son pasivos. Los métodos activos de prueba sólo se utilizan en el laboratorio, pero los métodos pasivos son muy utilizados en el campo.

2.3 Medición o detección de potencial

La manera más simple para detectar el potencial que existe a través de un aislador es ponerlo en cortocircuito, y esperar a escuchar un ruido cuando el contacto es hecho. Este es el método de zumbido descrito anteriormente. Se han ideado métodos aun más sofisticados y algunos de ellos incluso permiten la medida real del potencial a través de los aisladores en una cadena. En 1925, a Bennett [4] le fue concedida una patente en Estados Unidos para una especie de voltímetro electrostático, él lo montó en el extremo de un aislador delgado a través del cual, el potencial del aislador podría ser medido. En 1933, a Spangler [5] le fue concedida otra patente para un dispositivo que utilizó una bombilla en un recinto blindado para detectar el potencial a través del aislador. En 1941, Forrest de Inglaterra presentó un artículo [6] en el cual dio los resultados obtenidos con un dispositivo similar a los Bennett. Particularidades de su dispositivo fueron el uso de condensadores coaxiales en serie variables para ajustar la medida de sensibilidad y el campo electrostático. De esta forma se reducen errores en la lectura debido a la inducción de un campo eléctrico. Los resultados presentados en este artículo indican que el método puede ser

general, práctico y además confiable en una cadena de aisladores de porcelana para sistemas de voltaje superiores a 132kV, la condición de humedad del aire debe de estar por debajo 70%. A Castelli [7] se le concedió una patente en Italia en 1954, para un tipo de dispositivo similar, que media el potencial a través del aislador por medio de un metro D'Arsonval, el cual es colocado en serie con la resistencia de alto voltaje.

2.4 Medición de resistencia

Encontrar la falla de un aislador por la medición de resistencia es mejor cuando la línea no esta energizada, debido a que la presencia de alto voltaje de corriente alterna generalmente interfiere con la medición de la resistencia a realizar generalmente con corriente continua. Este método se utilizó hasta 1980 especialmente para probar aisladores antes de que estos fueran instalados en las líneas, por medio de un megómetro (medidor de resistencia) ordinario. Una patente en 1981 le fue concedida a C.W. Devine, de Canadá [8], para un dispositivo verdaderamente práctico de este tipo que se podría también utilizar para comprobar aisladores bajo condiciones energizadas de servicio.

Este dispositivo utiliza un condensador cargado como fuente de la corriente continua para la medición de resistencia. Se hace de dos maneras: una unidad de carga y una unidad de metro. La unidad de metro es muy simple y es diseñada para ser conectada al extremo de un electrodo energizado. Este electrodo puede ser cargado en 20 segundos conectándose a la unidad de carga y se puede utilizar solamente después que su condensador interno se haya cargado. Mientras se están probando los aisladores, el valor de la resistencia se lee directamente en el metro. Esto no es conveniente para las cadenas largas de aisladores debido a la distancia considerable implicada. El dispositivo es práctico para cadenas de aisladores cortas.

2.5 Medición del campo eléctrico

La desventaja común que se aprecia en los métodos mencionados anteriormente son sus conexiones, las cuales deben ser hechas a cada aislador de la cadena. Esto implica una tarea delicada, que consume mucho tiempo, además la operación se vuelve riesgosa. Una mejor manera sería medir el campo eléctrico a una menor distancia en cada aislador, tarea realizada a cada aislador individualmente.

Se ha desarrollado un nuevo probador de aisladores de suspensión basado en el método de la medida del campo eléctrico, figura 2.1 y 2.2. A este dispositivo se le concedió las patentes de Estados Unidos y Canadá en 1988 y 1989 respectivamente [9,10].

El dispositivo consta de dos unidades separadas: la primera es la unidad de medida y grabación del campo eléctrico la cual esta montada en una especie de trineo especialmente diseñado para tal fin, se referirá como el probador. La segunda unidad, la calculadora, se le ingresa unos datos que incluyen información sobre el horario de prueba y la línea que va a probar. Este probador y la parte calculadora son totalmente independientes el uno del otro y ambos tienen relojes internos que necesitan ser sincronizados para tomar los datos contenidos en cada una de las dos unidades.

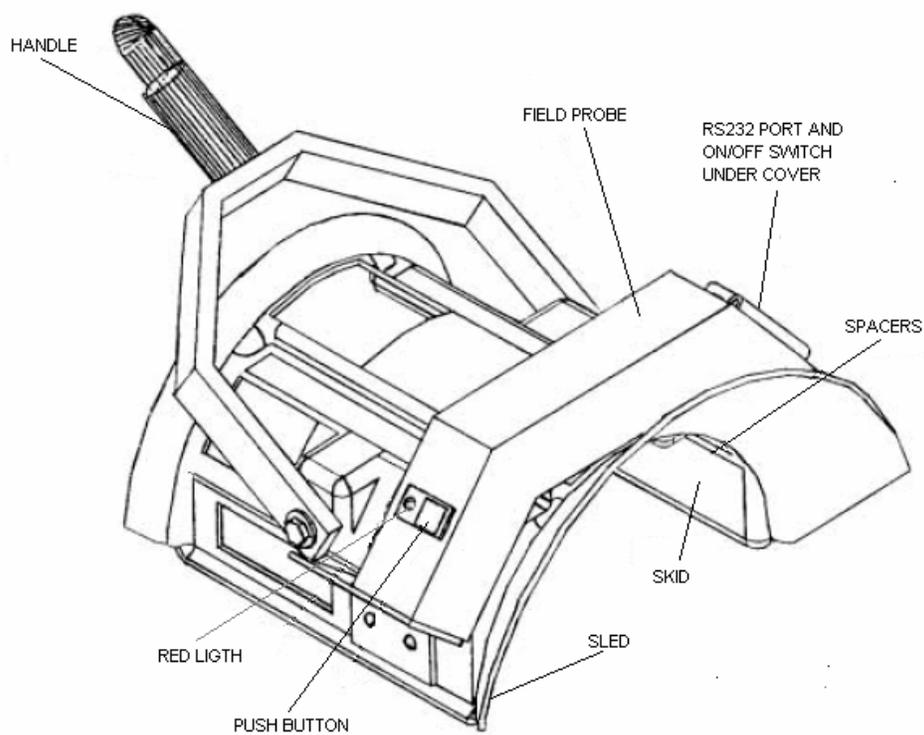


Figura 2.1. Probador de aisladores de suspensión [3]



Figura 2.2. Vista del nuevo probador de aisladores [3]

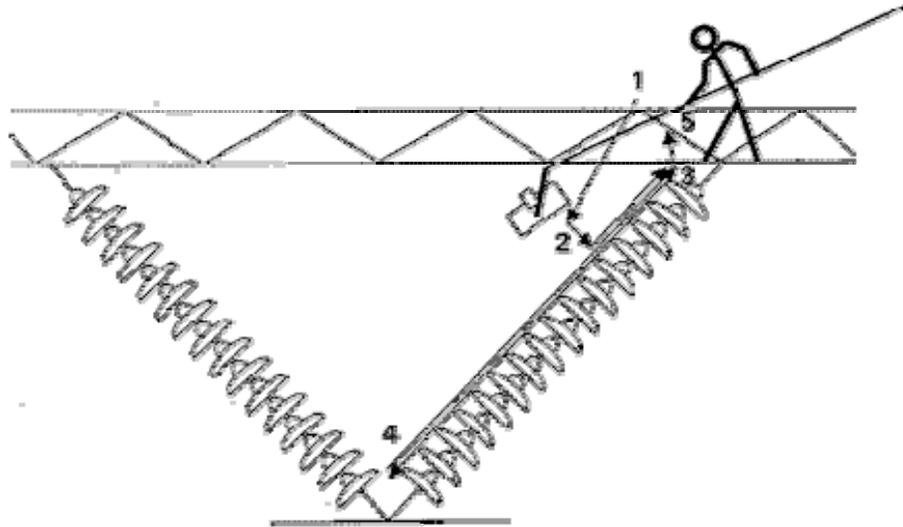


Figura 2.3. Descripción uso del nuevo probador de aisladores¹

Para realizar la sincronización, ambas unidades están conectadas con un ordenador personal que a su vez contiene un programa para generar un horario de prueba que se colocará en la unidad calculadora. Los datos que se generan y se cargan en la unidad calculadora consisten en el número de la línea de la transmisión, el número de la torre, la identificación de la fase y números de la secuencia del aislador. Toda esta información se coloca entonces en la unidad calculadora, que tiene suficiente memoria para almacenar dicha información. Cabe recalcar que esta unidad puede contener información de más de 500 secuencias de aisladores [3].

2.6 Simulación de carga (CSM)

El Charge Simulation Method o CSM (siglas en inglés) está particularmente bien satisfecho para los dominios con límites abiertos, tales como aisladores de alto voltaje al aire libre. Aunque el CSM no tiene ninguna restricción dentro de la geometría del dominio, este se prefiere generalmente para geometrías con superficies de curvas que tienen cierto grado de simetría,

¹ Tomado de <http://www3.sympatico.ca/tc42sec/step1.htm>

características encontradas comúnmente en los aisladores de alto voltaje [11]. El CSM tiene la ventaja adicional de usar un número reducido de desconocidas y por tanto menos tiempo de cómputo sobre otras técnicas numéricas [12]. Aun así, la complejidad de la técnica, el tiempo de cómputo y el requisito de memoria llegan a ser considerables cuando el tamaño del objeto aumenta para aisladores de más alto voltaje.

En el método de CSM [11-13], el objeto bajo prueba es modelado por un sistema discreto de cargas internas cuyas posiciones y tipo son predeterminadas, pero cuya magnitud es desconocida. Las condiciones de frontera se asignan en un sistema de puntos elegidos arbitrariamente. El número de puntos de la frontera iguala el número de cargas desconocidas de la simulación. Los valores de las cargas desconocidas obtenidas en el CSM satisfacen las condiciones de frontera con una exactitud aceptable, número y localización de éstas cargas [14-15]. De acuerdo con resultados presentados anteriormente por Kaana-Nkusi, et al. [16-17], para alcanzar una exactitud aceptable, se debe utilizar una gran cantidad de cargas de simulación para determinar el campo eléctrico de los aisladores relativamente pequeños con geometría simple. Esto conduce a un aumento subsiguiente de requerimiento de memoria y tiempo de cómputo para aisladores más largos, ya que puede degradar la capacidad de la técnica para dar una solución útil.

Para calcular el potencial y el campo eléctrico de aisladores de alto voltaje se desarrolló un método de simulación de carga usando optimización de restricciones iterativas con igualdades y de desigualdades constantes [18].

En esta técnica, después de que el tipo y el número de cargas simuladas son elegidas, la posición y/o la magnitud de las cargas se seleccionan como variables de diseño. Después de enmarcar la función objetivo, un algoritmo de minimización se utiliza para obtener la solución que reduce al mínimo la función

objetivo y también satisface las restricciones. La limitación principal de esta técnica radica en que cuando se ha obtenido las soluciones para la secuencia de la cadena de aisladores de alto voltaje, (usada para 230 kilovoltios y más) dichas soluciones son complicadas debido a la cantidad de información que se maneja. El índice de convergencia y de estabilidad del algoritmo de optimización es influenciado por el valor inicial de los parámetros de optimización así como el tipo y la eficacia de la función objetivo. También, esta técnica tiene limitaciones desde el punto de vista de los requisitos extensos de memoria y de tiempo de computación.

El objetivo del trabajo realizado por El-Kishky [19] fue desarrollar un método modificado de simulación de carga (MCSM) que superaría los defectos principales de técnicas anteriores de simulación de carga. Esto podría permitir los cálculos del campo eléctrico y potenciales en cadenas grandes de aisladores de alto voltaje. El condicionamiento del sistema es calculado y utilizado como una bandera para determinar el algoritmo más eficaz para reducir al mínimo la función objetivo. El concepto de error relativo acumulativo se introduce como mejor indicador de la utilidad de la solución. Esto debería ser mencionado ya que hay varios paquetes comerciales basados en el elemento finito, diferencia finita, métodos finitos etc., que están actualmente disponibles para el cálculo del campo del aislador al aire libre de alto voltaje. La comparación del MCSM con estos paquetes se ha evitado, debido a que el trabajo actual, se encuentra todavía en la etapa de desarrollo.

2.7 Estudio en la forma del campo eléctrico y mecanismo de descarga disruptiva de un aislador de suspensión contaminado

En los años 70, se comenzó a estudiar el mecanismo de descarga disruptiva de aisladores contaminados. Aunque es muy difícil establecer el modelo matemático para dicha descarga, ciertos investigadores han comenzado

a estudiar la relación entre la distribución del campo eléctrico a lo largo de la superficie del aislador y el desarrollo de arcos locales [20]. Estos estudios darán luz sobre el mecanismo de la descarga disruptiva desde el punto de vista de su esencia física. En dicho estudio se investiga la forma del campo eléctrico y el mecanismo de descarga disruptiva de un aislador de suspensión contaminado, se calcula la distribución del campo eléctrico a lo largo de la superficie del aislador de suspensión (Xp-70) bajo condiciones de limpieza total, contaminación, humedad, apariciones de arcos locales y desarrollo de los mismos. Los investigadores basaron sus cálculos en el método simulado complejo de cargas de densidad de línea cambiables optimizadas [20].

El principio básico del método de simulación de carga es muy simple. Si varias cargas discretas de cualquier tipo (punto, línea, o anillo, por ejemplo) están presentes en una región, el potencial eléctrico y estático en cualquier punto C se puede encontrar por la adición de los potenciales, resultado que se obtiene de las cargas individuales, mientras el punto C no reside en ninguna de las cargas. Dejemos Q_j sea un número de n cargas individuales y ϕ_i sea el potencial en cualquier punto C dentro del espacio. Según el principio de superposición.

$$\phi_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j \quad 2.1$$

Los valores P_{ij} son los coeficientes de potencial, que pueden ser evaluados analíticamente para muchos tipos de cargas, resolviendo las ecuaciones de Laplace o Poisson. Por ejemplo, en la figura 2.4, se muestra tres puntos de carga Q_1 , Q_2 y Q_3 en el vacío, el potencial ϕ_i al punto C_i es obtenido por:

$$\begin{aligned}\phi_i &= \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1} + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2} + \frac{Q_3}{4\pi\epsilon_0 R_3} \\ &= P_{i1}Q_1 + P_{i2}Q_2 + P_{i3}Q_3\end{aligned}\quad 2.2$$

Así, una vez que los tipos de cargas y sus localizaciones se definan, es posible relacionar ϕ_i y Q_j cuantitativamente en cualquier punto en el límite. En el mecanismo de descarga disruptiva, las cargas de la simulación se colocan fuera del espacio donde se desea la solución del campo (o interior, cualquier superficie equipotencial tal como electrodos metálicos). Si el punto del límite C está situado en la superficie de un conductor, entonces el ϕ_i en este punto de contorno es igual al potencial del conductor ϕ . Cuando este procedimiento se aplica a m puntos de contorno, esto conduce al sistema de m ecuaciones lineales para n cargas desconocidas.

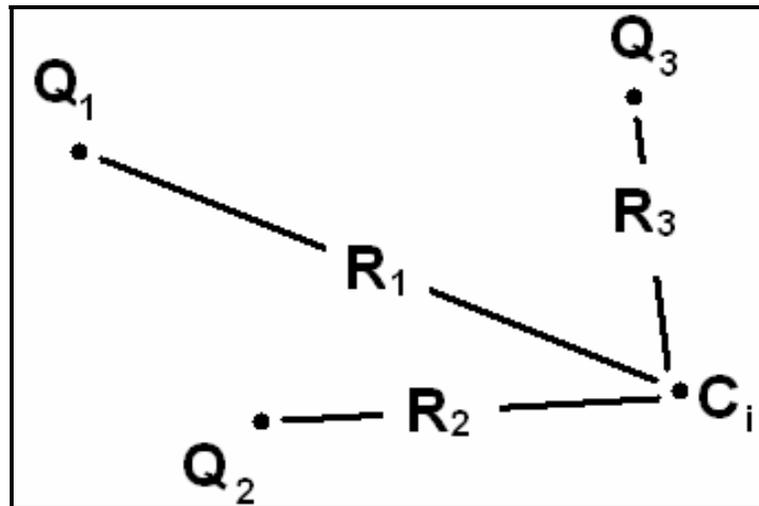


Figura 2.4. Tres puntos de cargas en el vacío [21].

2.7.1 Modelo estimado y método

El modelo estimado del aislador de suspensión XP-70 se muestra en la Figura 2.5. Hay 37 puntos de cargas simuladas en electrodos de alto voltaje y diez cargas de línea también simuladas. Hay 132 puntos de contornos en la interfaz dieléctrica a lo largo de la distancia de fuga y por consiguiente 264 puntos de carga en los dos lados de la interfase y dirección normal de los puntos de contorno.

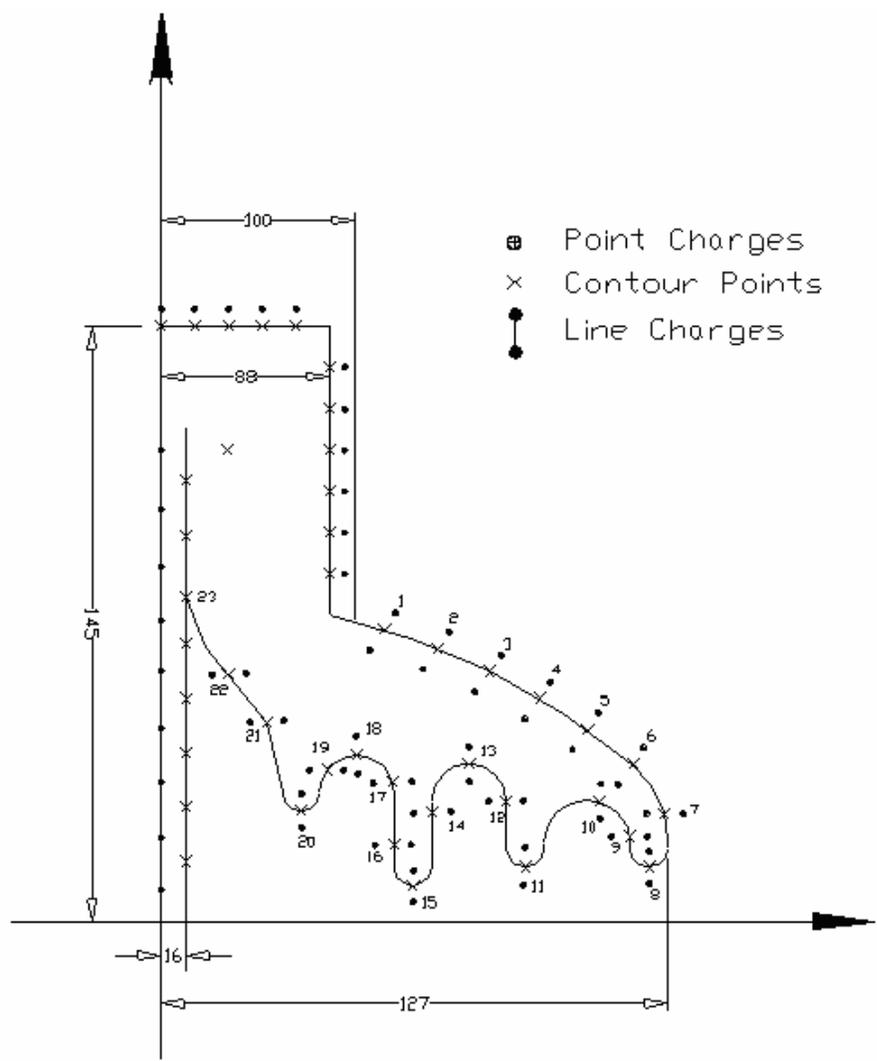


Figura 2.5. Modelo de cálculo del aislador de suspensión XP-70 [20]

Las coordenadas de estos puntos son conocidas. El voltaje estimado es 7.5kV (cerca del 85% del voltaje de descarga disruptiva). El término descarga disruptiva (o ruptura del dieléctrico), es aplicable a los fenómenos asociados con la falla del aislamiento bajo condiciones de demanda eléctrica, en la cual el aislamiento que se quiere probar es cortocircuitado completamente, reduciendo la tensión aplicada entre los electrodos a un valor prácticamente nulo. Es aplicable a la falla de dieléctricos sólidos, líquidos y gaseosos o sus combinaciones. Se pueden producir descargas fugitivas durante las cuales el objeto bajo estudio es momentáneamente cortocircuitado por un arco. La tensión en terminales del objeto bajo estudio entonces se reduce momentáneamente a cero o a un valor muy pequeño. Según las características del circuito de prueba y del objeto, el dieléctrico puede restablecer sus características, así mismo, la tensión de 0 voltios de prueba puede ser superada. Esto en principio debe considerarse como una descarga disruptiva. El arco local es simulado por líneas de carga [21].

2.8 Método de la disrupción

En el método de la disrupción [22], con una intensidad de campo eléctrico suficientemente alta para aumentar la movilidad de las partículas subatómicas el medio se ioniza. Esta ionización da origen a fenómenos luminosos y sonoros que son poco apreciables en condiciones normales, siendo el efecto corona el que más se manifiesta. Utilizando técnicas fotográficas de exposición prolongada se obtienen imágenes del campo, que proporciona una idea general aunque no muy bien definida. Como cada aislador se encuentra sometido a cierto valor de tensión, si las fotografías muestran igual luminosidad en cada unidad, la distribución de potencial será lineal, si por el contrario dicha luminosidad es diferente los aisladores más iluminados estarán soportando mayor tensión (no-linealidad). Esto permitió demostrar que los mayores gradientes de tensión ocurren en los aisladores más cercanos a la línea.

2.9 Método de las sustancias luminosas

El fundamento del método de las sustancias luminosas [22], consiste en la orientación de ciertas partículas o corpúsculos bajo la influencia de un campo eléctrico. Se necesita una mezcla de un líquido dieléctrico, con una sustancia sólida conductora cristalina en forma de polvo, que sea fluorescente y no sean solubles entre sí; con lo cual se proporciona un fino rocío artificial sobre la cadena de aisladores. Las partículas sólidas del rocío se orientan con el campo eléctrico y debido a su fluorescencia se pueden obtener fotografías con exposición prolongada. Se utiliza trementina doblemente rectificada y fluoresceína sódica para la mezcla.

2.10 Método del medidor electrónico

Consiste en elaborar un circuito electrónico que opere como un cuadripolo. A una cierta señal de entrada determinada por la frecuencia de una onda sinusoidal alterna, produce a la salida una cierta señal apreciable a la vista. El medidor es colocado a cada aislador entre el perno metálico y la cuenca donde se inserta este perno.

Este método del medidor electrónico [22], solo sirve para saber que aisladores se encuentran en buen estado, como el instrumento tiene un valor mínimo y otro máximo, los aisladores en mal estado no presentarán ningún valor de voltaje en los puntos donde se realiza la medición (entre la cuenca y el perno metálico) a la hora de realizar la prueba, debido a que el medidor solo operara en el rango que determina el usuario, dando una señal visual, en este caso se enciende el diodo led.

El diagrama de bloques se ilustra en la figura 2.6 tomado de WOLFGANG, et. al. [22], en el cual se representan la cadena de aisladores, un

rectificador con característica umbral (RU), un amplificador de potencia (AP), un diodo luminoso (LED) y una batería miniatura (BT). Con base en este diagrama de bloques se construyó un circuito electrónico.

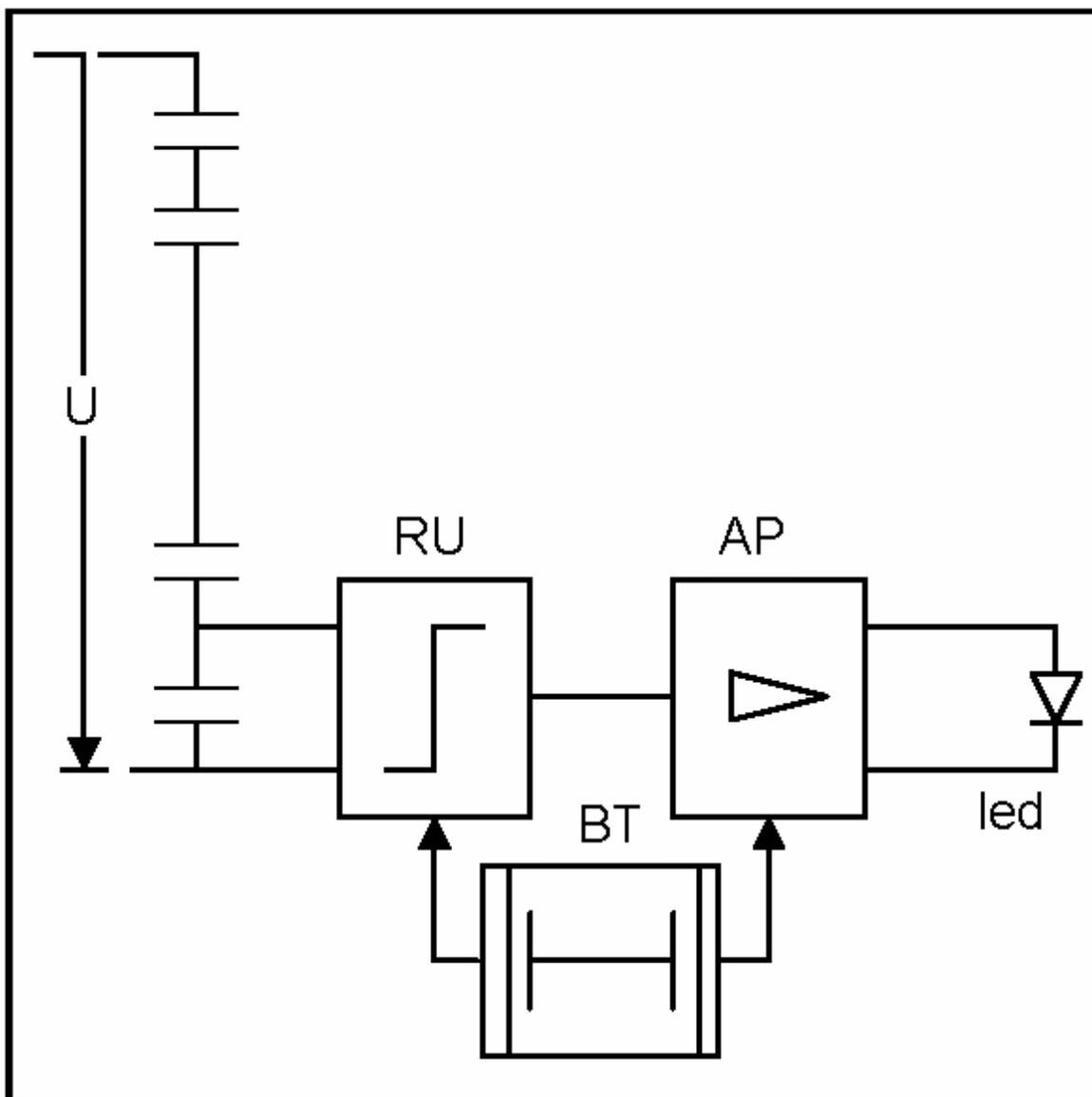


Figura 2.6. Diagrama de bloques circuito electrónico [22]

Debido a que los componentes electrónicos son muy delicados y sensibles a un campo eléctrico externo es necesario hacer un apantallamiento metálico al mismo; este aparato de medida debe construirse tan pequeño como sea posible para evitar perturbaciones mayores en el campo.

2.11 Método del pararrayos

El método del pararrayos [22], consiste en colocar un pararrayos con tensión de descarga conocida y muy bien determinada dentro del campo eléctrico producido por la cadena energizada de aisladores, según el tipo de conexión y la tensión de descarga puede determinarse la distribución de potencial; en todos los casos es necesario instalar un osciloscopio en el circuito de medida para determinar el momento exacto de la operación del pararrayos, puesto que este no presenta fenómenos claramente visibles o audibles.

2.11.1 Pararrayos en serie

El método del pararrayos en serie [22], consiste en colocar el pararrayos en serie con el divisor resistivo (o capacitivo) que toma la señal para el osciloscopio y conectando el terminal de medida sucesivamente en cada aislador según se muestra en la figura 2.7. Cuando se presenta la descarga es porque en el punto de medida se ha sobrepasado el nivel de reacción del pararrayos, con este valor y el voltaje aplicado a la cadena se obtiene el porcentaje de tensión en este punto y en la unidad correspondiente.

La prueba se realiza primero con el aislador que esta mas cercano a potencial de tierra, para luego seguir avanzando hasta el aislador que sustenta la línea de transmisión. Se debe hacer de este modo, pues así se conoce el valor de voltaje que esta soportando el aislador al cual se le esta practicando la prueba (en esta caso al primero), luego se procede con el segundo en su orden

de abajo (ground) hacia arriba (línea), como ya se conoce el valor del primero aislador es fácil de conocer el valor de voltaje al cual esta siendo sometido este aislador, así se hace con todos los demás aisladores.

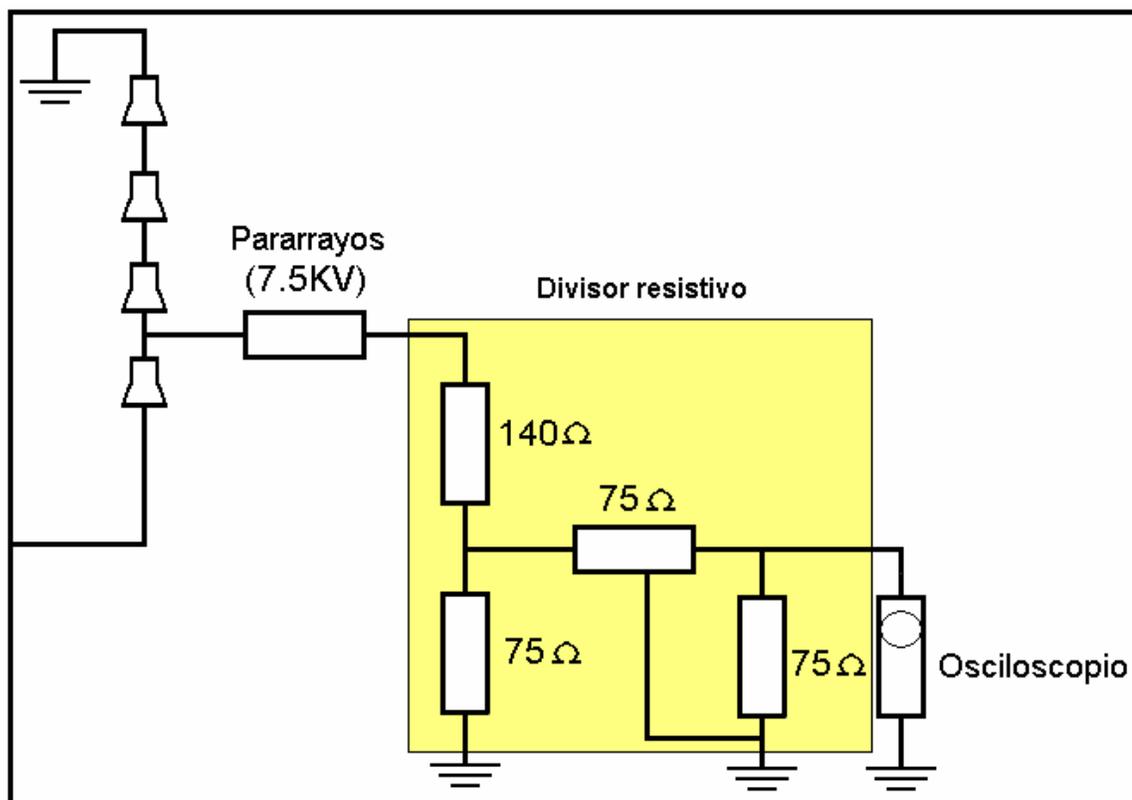


Figura 2.7. Montaje del pararrayos en serie [22]

2.11.2 Pararrayos en paralelo

En este caso del pararrayos en paralelo [22] el montaje de instalación del pararrayos es paralelo con el divisor que toma la señal para el osciloscopio. Con un análisis similar al anterior se obtienen los porcentajes de tensión en cada unidad. La diferencia consiste en que el divisor va antes de la descarga, mientras que en el montaje anterior (pararrayos en serie) el divisor esta después de la descarga, otra ventaja de este montaje es que la corriente es permanente,

por lo tanto se obtiene una mejor visualización de la onda, la figura 2.8 ilustra este montaje.

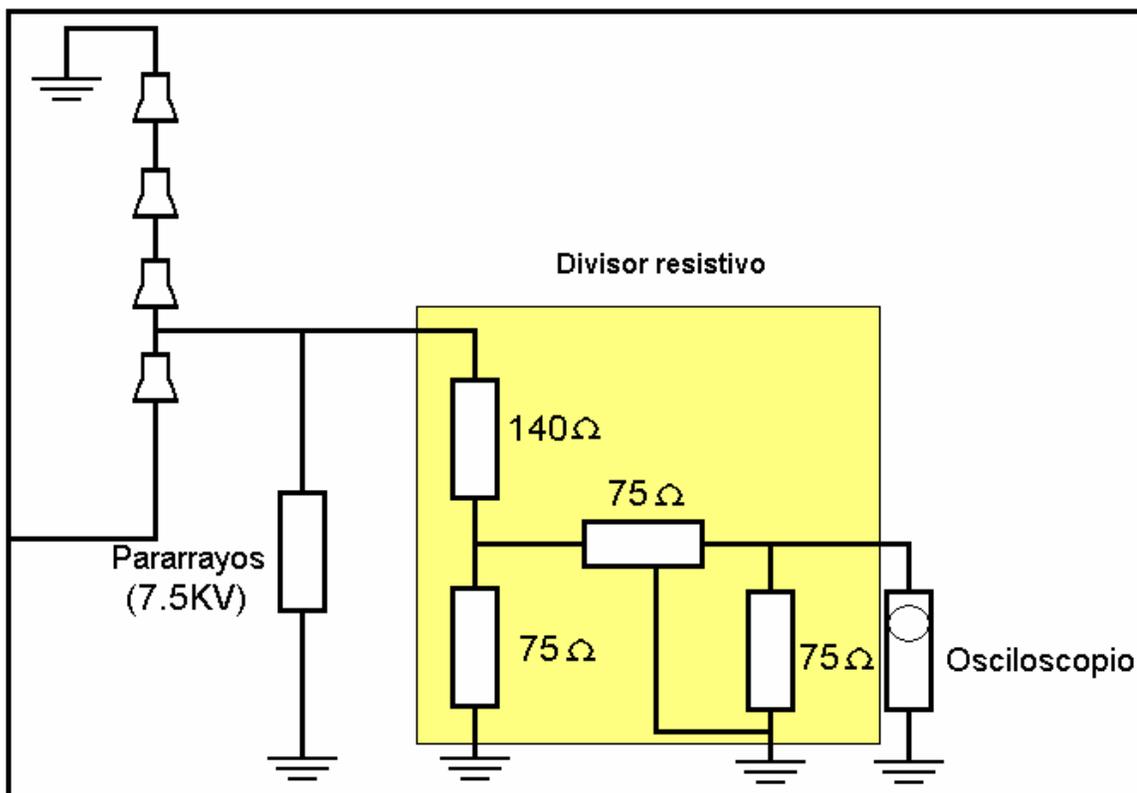


Figura 2.8. Montaje del pararrayos en paralelo [22]

2.11.3 Pararrayos en cada unidad

En este caso del pararrayos en cada unidad [22], se instala directamente en paralelo con cada aislador mientras el divisor resistivo se coloca entre la línea y la tierra. Cuando ocurre el corto es por que se ha sobrepasado el nivel de reacción del pararrayos por lo tanto los valores de voltaje son redistribuidos entre los aisladores que quedan presentes dentro de la cadena, esto ocurre al momento de presentarse el trasciende. La señal que es captada por el osciloscopio es mucho menor pero el porcentaje de tensión en cada unidad es encontrado directamente.

Para estudiar cadenas de aisladores largas es necesario utilizar un pararrayos con muy baja tensión de reacción o disponer de transformadores de muy altas tensiones para poder tomar mediciones en las unidades más cercanas a tierra, el esquema del montaje puede apreciarse en la figura 2.9.

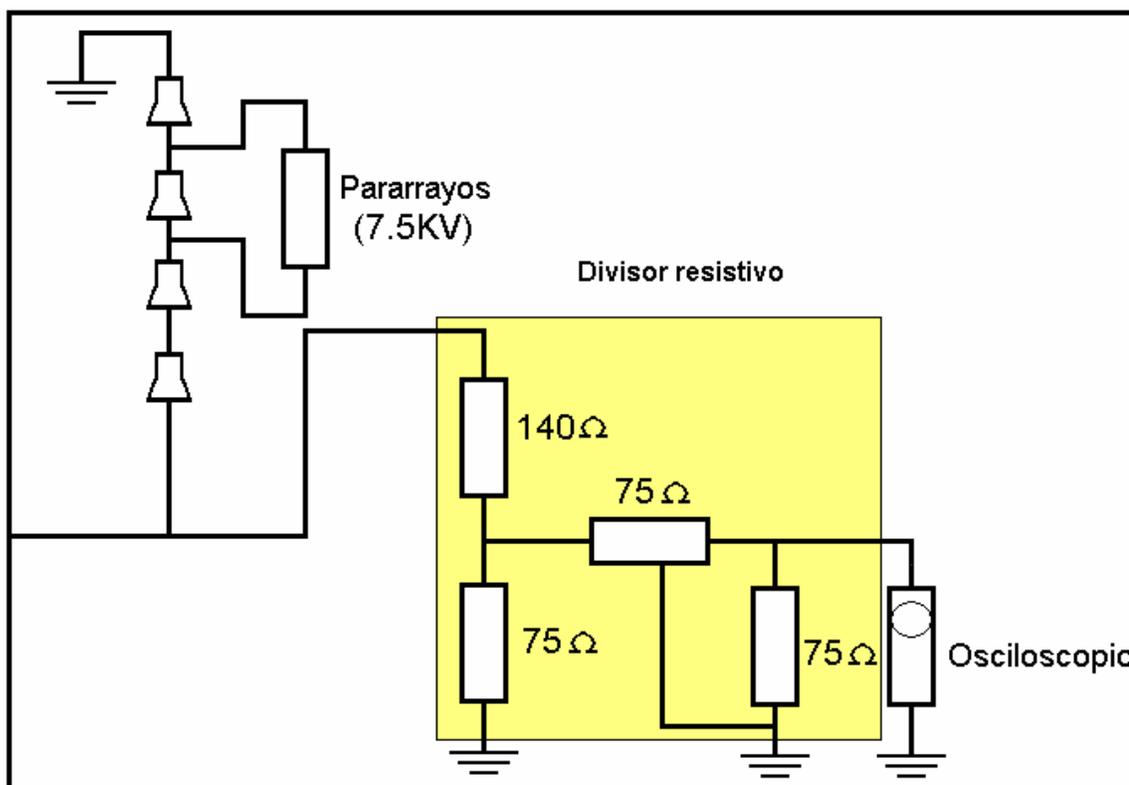


Figura 2.9. Montaje del pararrayos en cada unidad [22]

2.12 Método del explosor

La conexión hecha en el método del explosor [22], (se llama así debido a que reproduce un ruido al utilizar este método) utilizada es similar a la del pararrayos en cada unidad [22], (el comportamiento de los dos es similar). La ventaja de este método es que se dispone de un mayor rango de graduación de la tensión de ruptura según la distancia y tipo de los electrodos, y por otra parte es muy notorio el punto de reacción tanto visual como auditivamente, eliminándose errores de apreciación en la onda del osciloscopio.

Capítulo 3

Método Seleccionado

3.1 Elemento Finito

Para nuestro análisis se utilizará el método de elemento finito (FEM por sus siglas en inglés) como herramienta para simular la distribución de voltajes en aisladores de suspensión. Para ello contamos con el programa Quick Field, el cual nos permitirá hacer simulaciones del diseño propuesto. El método elegido fue hecho por su fácil comprensión y desarrollo. Otros métodos pueden ser usados para llevar a cabo simulaciones del mismo tipo.

En la próxima sección se mostrara, usando un ejemplo, el concepto de FEM para nuestro análisis. Utilizaremos un modelo de cuadriláteros, con el propósito de familiarizarnos con el método FEM. Aunque la apariencia del modelo simplificado no es muy cercana a la verdadera forma del aislador, según vemos en la figura 3.1, este proceso nos permitirá mirar el comportamiento en la distribución de voltajes y conocer analíticamente el método, FEM.

El modelo que se muestra en la figura 3.1 se ha dividido en 15 partes (sólo se analiza la mitad del aislador, debido a su simetría geométrica). El proceso se llevará a cabo haciendo los cálculos de forma manual y eventualmente con asistencia del programa comercial Quick Field. Por la limitación del programa y de los cálculos que se deben realizar en forma manual, vamos a utilizar el modelo simplificado en ambos casos (se usaran divisiones en forma de cuadriláteros para facilitar el calculo). Los valores de potencial son tomados en por unidad (p.u.), para simplificar el ejemplo.

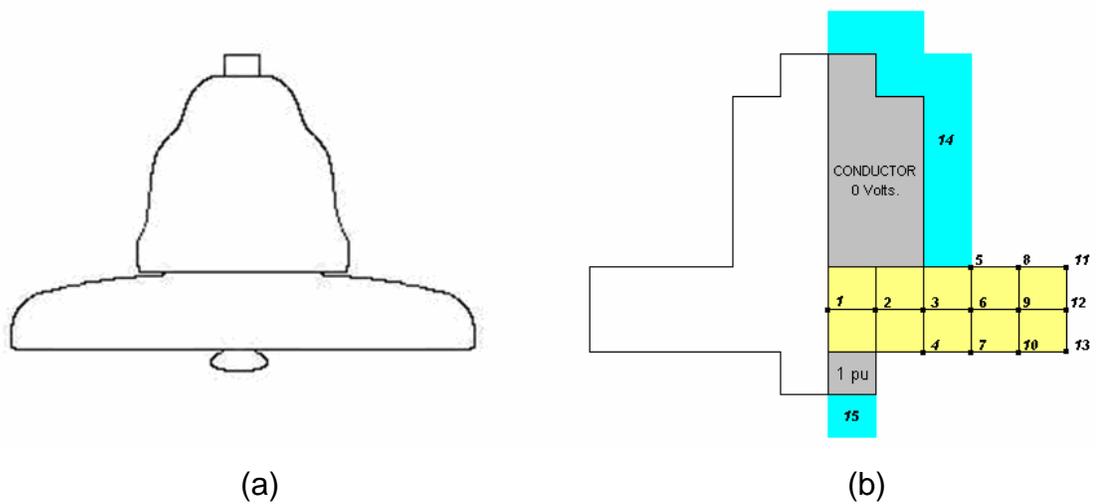


Figura 3.1. Aislador en su forma física (a) y aislador ha utilizarse en el análisis manual (b)

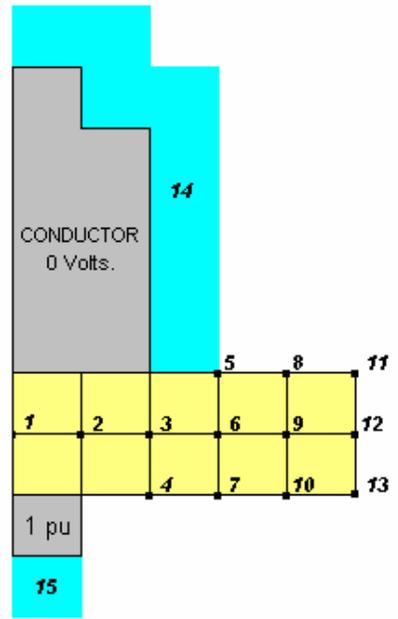


Figura 3.2. Distribución de los diferentes nodos usados para el análisis de FEM

Los nodos 14 y 15 se comportan como supernodos (terminal donde llegan muchos elementos), teniendo al primero un valor de 0 voltios y el segundo con un valor de 1 p.u. El nodo 14 corresponde al soporte del aislador con la torre de la línea de transmisión. El nodo 15 sería el soporte del conductor de fase.

Con las 15 divisiones hechas en el aislador encontramos los valores para llenar la matriz de “rigidez” (Stiffness), luego se multiplicará por un vector columna donde se almacenarán los valores de voltaje conocidos y los que se interesa conocer, esta multiplicación se iguala a cero (ya que deseamos cero corriente a través del aislador), o sea:

$$YV = 0 \qquad \qquad \qquad \mathbf{3.1}$$

Donde

Y = Matriz Rigidez (Stiffness), representa las admitancias discretas en los nodos.

V = Matriz de Voltajes conocidos y desconocidos.

El término de Matriz de rigidez (“Stiffness matriz”) es originado de análisis de estructuras. Aplicaciones más recientes del Método de Elemento Finito fueron similares a análisis estructurales de matrices y el término fue utilizado para describir la relación de matriz entre fuerza y desplazamiento. Ahora el término es usado para cualquier aplicación.

Para encontrar los valores de la matriz de admitancia se divide el aislador en muchos triángulos tal como se observa en la figura 3.3,

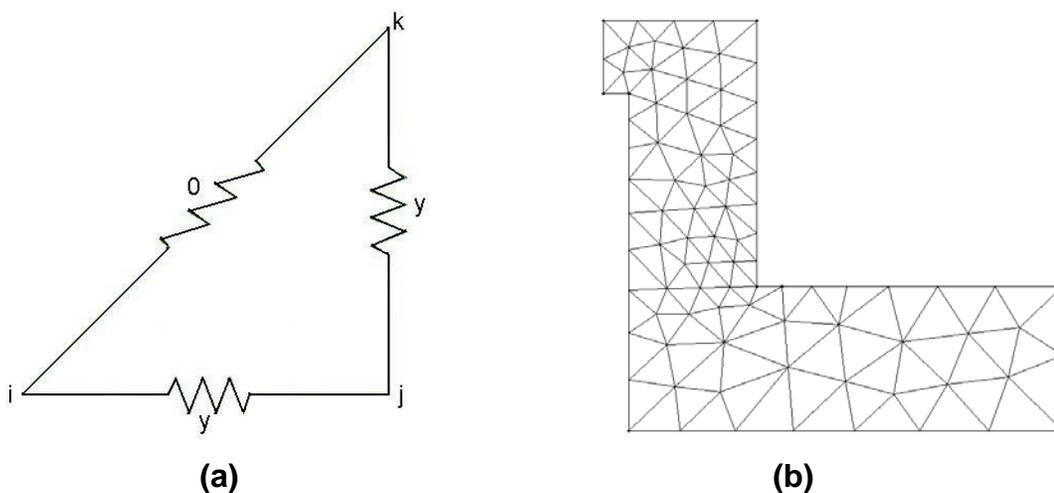


Figura 3.3. Forma del triángulo (a) usado en el análisis de elemento finito (FEM), i, j y k nombres dados a los vértices, donde la impedancia entre cada vértice tiene valor de 1 por unidad, (b) división de triángulos hecha por el programa Quick Field (Refiérase al apéndice A)

Las relaciones de los valores de admitancias, de los elementos de la matriz son:

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \quad 3.2$$

$$Y_{ij} = -Y(i, j) \quad 3.3$$

$$Y_{jk} = -Y(j, k) \quad 3.4$$

$$Y_{ki} = -Y(k, i) \quad 3.5$$

Las matrices se definirán de esta manera,

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vu \\ Vk \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \\ u \end{bmatrix} \quad 3.6$$

Para reducir la matriz de admitancia (la cual es dividida en submatrices para efectos de cálculos) se utiliza un método de ecuaciones lineales, en donde sólo se usan las submatrices A , V_u (son los voltajes en los nodos desconocidos), B y V_k (son los voltajes en los nodos conocidos). De ahí se aplica la siguiente igualdad:

$$[A][V_u] + [B][V_k] = 0 \quad \mathbf{3.7}$$

Despejando se obtiene:

$$[A][V_u] = -[B][V_k] \quad \mathbf{3.8}$$

$$[V_u] = -[A]^{-1}[B][V_k] \quad \mathbf{3.9}$$

Lo anterior es obtenido después al utilizar la eliminación de Gauss y con la sustitución posterior encontraremos el resto de los valores de voltaje.

$YV = I$, como idealmente no debe haber I (por que el sujeto bajo estudio es un aislador), entonces $YV = 0$, de aquí entonces se trabaja con las características de las matrices, que son altamente dispersa (matriz con demasiados valores equivalentes a cero).

Al aplicar el método, anteriormente mencionado, usando una admitancia unitaria entre cada nodo, a un solo aislador obtenemos los valores de las submatrices A , B y V_k (donde se hallan los valores de voltaje conocidos), los cuales se muestra a continuación:

$$A = \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 4 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 4 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 3 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 4 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 3 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 3 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 4 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 3 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{3.10}$$

$$B = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -1 & -1 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad V_k = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{3.11}$$

$$Vu = A^{-1} * - B * Vk = \begin{bmatrix} 0.4854 \\ 0.4561 \\ 0.3391 \\ 0.5856 \\ 0.1924 \\ 0.3147 \\ 0.4176 \\ 0.2625 \\ 0.3096 \\ 0.3526 \\ 0.2855 \\ 0.3086 \\ 0.3306 \end{bmatrix} \quad \mathbf{3.12}$$

Así se obtienen los valores de las variables de voltaje que se estaban buscando, dando como resultado los valores mostrados en la tabla 3.1 para cada uno de los nodos establecidos en el aislador. El valor del nodo 14 y del nodo 15 no aparece debido a que ya conocemos su valor y dicho valor se encuentra en la submatriz V_k :

En los resultados mostrados en la tabla 3.1 se observa que el mayor esfuerzo se encuentra en los nodos V1, V2 y V4, lo cual es consistente con lo esperado debido a que estos nodos están mas cerca del conductor de fase.

Nodo	Voltaje
V1	0.4846
V2	0.4538
V3	0.3306
V4	0.5741
V5	0.1773
V6	0.2946
V7	0.3918
V8	0.2374
V9	0.2785
V10	0.3067
V11	0.2563
V12	0.2753
V13	0.2910

Tabla 3.1. Valores de voltaje en los diferentes nodos donde el potencial no es conocido

3.2 Análisis de la variación de voltajes utilizando dos aisladores

Ahora utilizando el mismo planteamiento se analiza el comportamiento de estos voltajes utilizando dos aisladores, donde obtenemos los resultados en la figura 3.4.

Se espera que el voltaje total entre el nodo 28 y 29 sea distribuido en forma equitativa entre los aisladores. Se puede observar de los resultados, que el voltaje no es distribuido uniformemente se esperaría que en el supernodo 2 hubiera la mitad del voltaje (0.5 p.u.) pero como se observa en la figura 3.4 este valor es muy diferente y menor (0.4121 p.u.) al esperado, por consiguiente el aislador que esta en contacto con la línea es el que soporta mayor estrés. Esta observación es consistente con lo visto en este tipo de arreglo y se debe a la capacitancia existente entre cada aislador y potencial de tierra. De este resultado se deriva la idea de buscar una forma en la que estos voltajes sean distribuidos equitativamente, o por lo menos se acerquen a los valores que deseamos que se tengan en esos nodos.

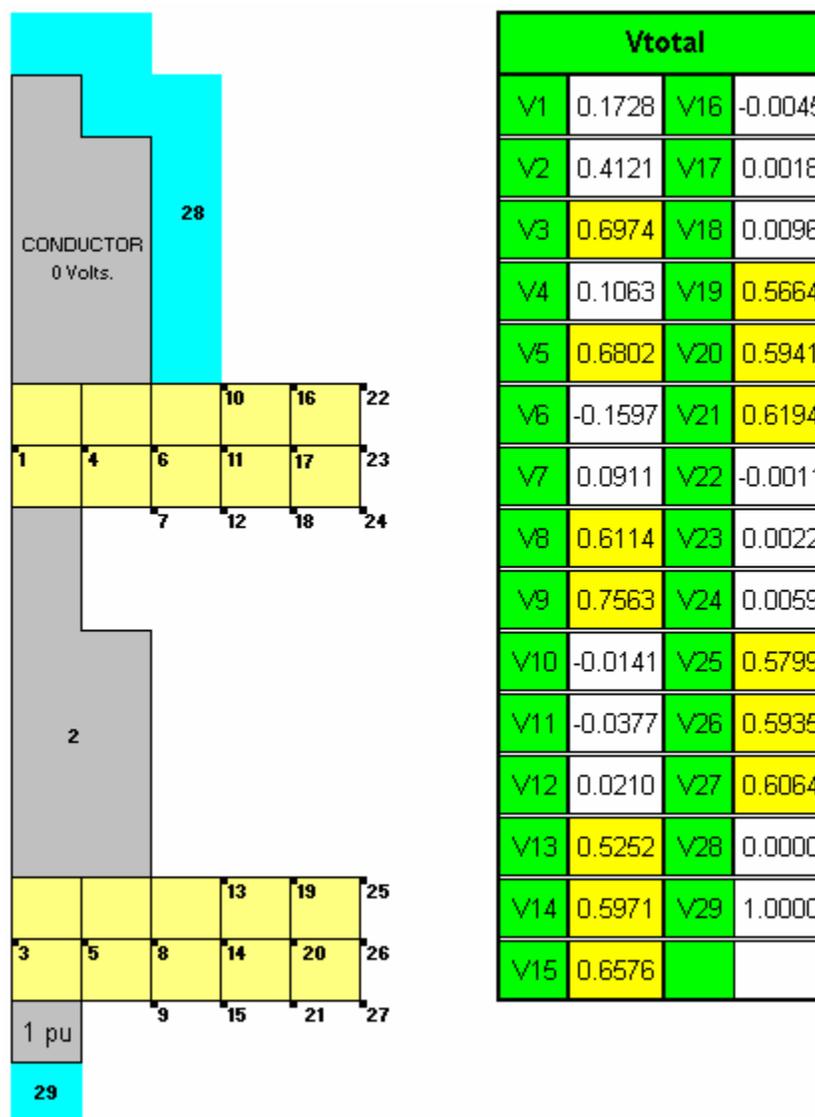


Figura 3.4. Valores de los nodos desconocidos con un arreglo de dos aisladores

Luego se han realizado otras posibles combinaciones geométricas para ver el comportamiento de los voltajes a través de la superficie de los aisladores. Dichos resultados revelan que en realidad se da un cambio en los valores de los voltajes. Aunque esos valores parecen no variar mucho, se debe tener en cuenta que se ha tomado como referencia (y como una forma de realizar los cálculos manualmente) las divisiones mostradas. Esto se debe a que al hacer divisiones

más pequeñas la matriz crece en proporción al número de nodos que se utiliza, haciendo difícil elaborar los cálculos necesarios para obtener la matriz. En las siguientes figuras 3.5 a 3.8 se muestran dichos valores,

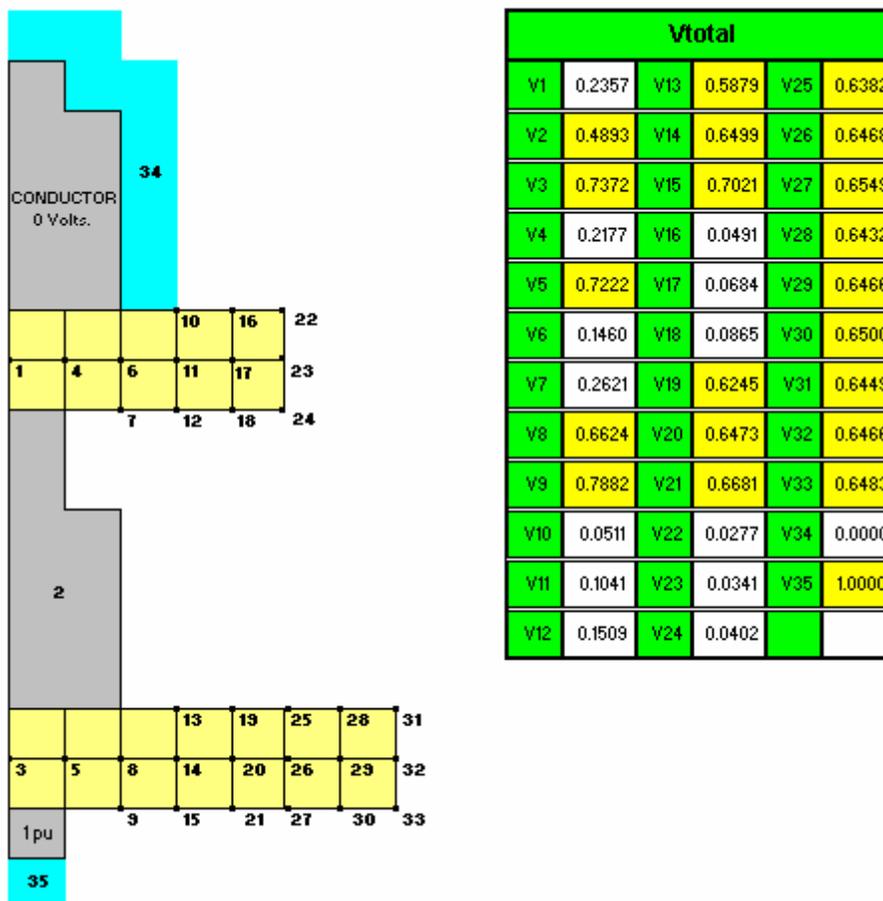


Figura 3.5. Variación del largo del aislador inferior y valores de los nodos

En la nueva disposición mostrada en las figuras 3.5 y 3.6 donde se ha aumentado el 40 % al largo del aislador (al primero en la figura 3.5 y al segundo en la figura 3.6), se observa como el supernodo 2 se acerca al valor de 0.5 por unidad, cuyo valor es el deseado. Hasta el momento se notan cambios en los nodos tomados en consideración. Esto nos indica que variando la forma del aislador (se varían las dimensiones para observar su comportamiento) es posible llegar al valor deseado. Hay que tener en cuenta que este análisis es

preliminar, debido a que no se toman muchas características reales que se dan en un aislador. Sin embargo, el análisis sí indica que se puede lograr un diseño óptimo muy aproximado a lo esperado.

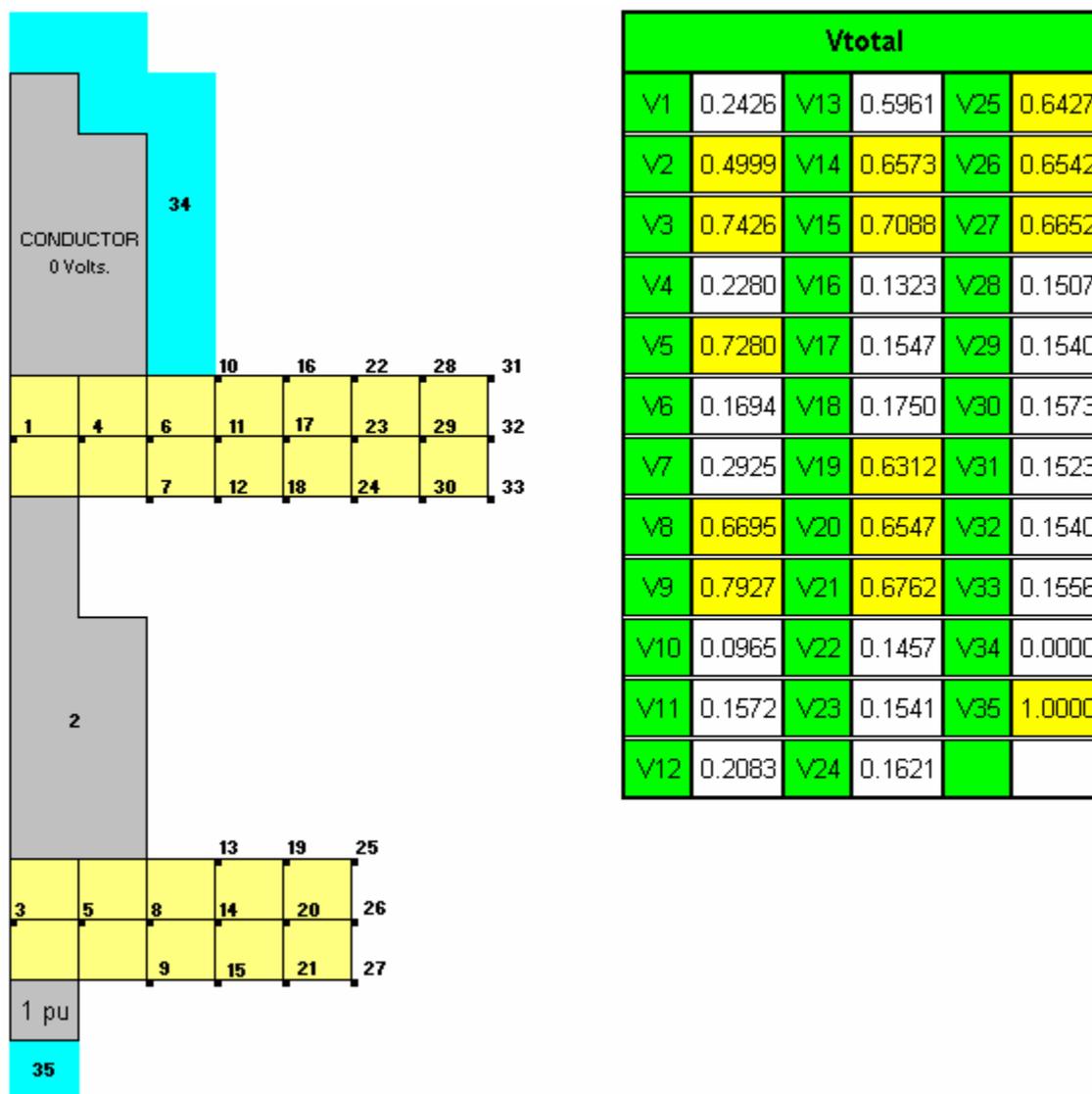


Figura 3.6. Variación del largo del aislador superior y valores de los nodos

Nuevamente en la figura 3.6 se cambia el diseño, en este caso el aislador que está más lejos de la línea su diámetro es mayor. También se observa que el voltaje en el supernodo 2 ha variado aún más y se ha acercado al valor que

buscamos. Nuevamente el cambio realizado es para observar el comportamiento del valor del voltaje en el nodo elegido.

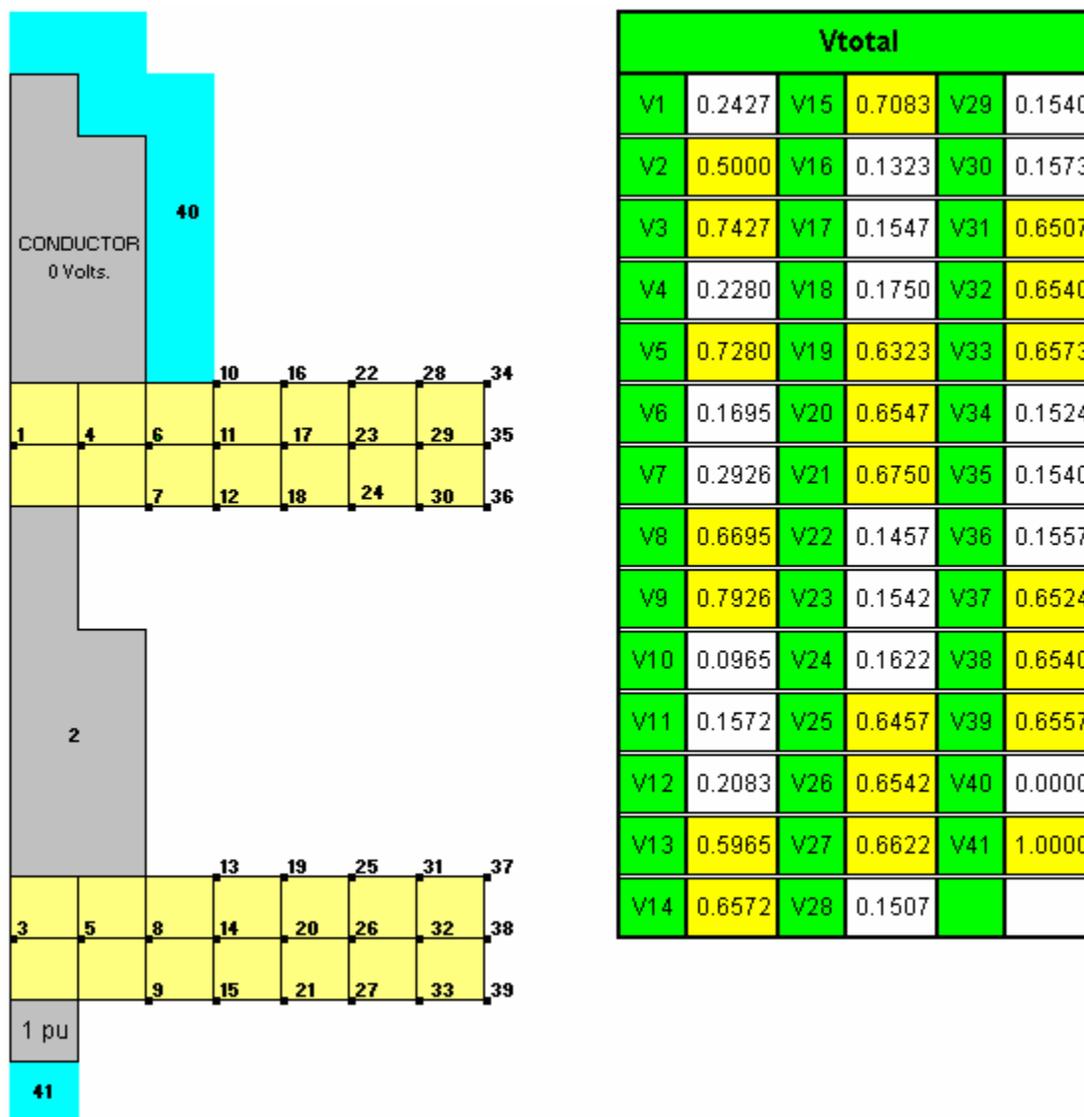


Figura 3.7. Variación del largo de ambos aisladores y valores de los nodos

En el diseño presentado en la figura 3.7 se ha aumentado los diámetros. Se observa un cambio muy sustancial en el valor del supernodo 2, el cual produce el resultado deseado.

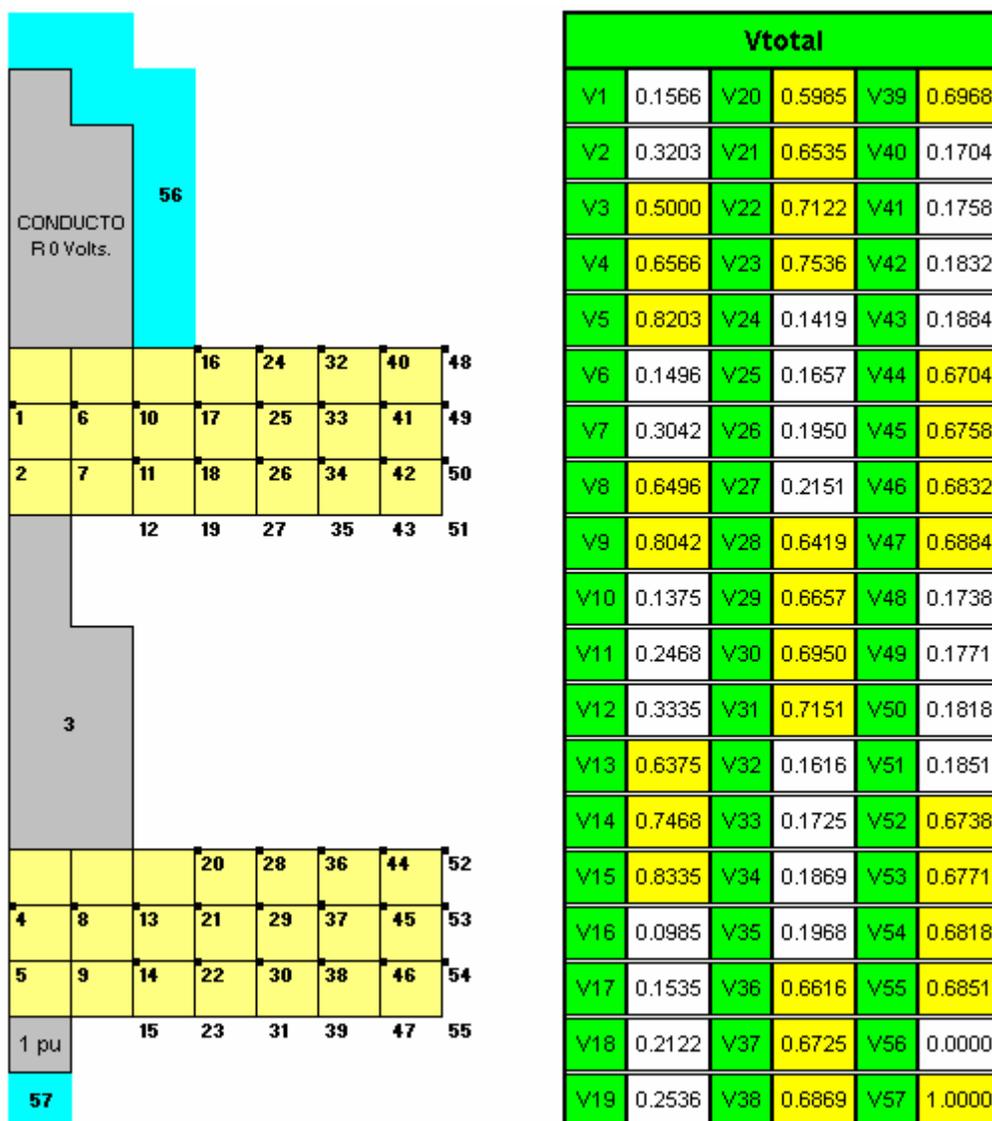


Figura 3.8. Variación del ancho de ambos aisladores y valores de los nodos

Aunque en el anterior diseño (figura 3.8) se llega al valor deseado de 0.5 por unidad, se ha querido ver otras posibilidades en donde se cumpla nuestro objetivo. Es importante observar que mientras se continué aumentando en tamaño a los aisladores, se continuara mejorando la distribución de voltajes. Si embargo, lo presentado en las figuras 3.7 y 3.8 parece no ser práctico ya que el tamaño de los discos sería demasiado grande, aumentando costos relacionados

a la producción de los mismos, así como otros problemas mecánicos que tendrían que analizarse.

En la tabla 3.2 relacionamos los valores de voltaje obtenidos en el supernodo número 2. En la figura 3.8 se toma el supernodo 3, que en esa figura representa el soporte conductivo del arreglo. Se elige este nodo, pues podemos con certeza saber su valor (aunque se podría tomar arbitrariamente cualquier otro valor). De la tabla 3.2 podemos observar cómo la variación geométrica hace que la distribución de voltajes varié.

Figura	13	14	15	16	17
V2	0.4121	0.4893	0.4999	0.5000	
V3					0.5000

Tabla 3.2. Valores de voltaje del supernodo 2 y 3

Habiendo observado distintas formas en las cuales podemos variar el diseño de los aisladores para conformar una cadena de aisladores de suspensión, vemos que nuestros ejemplos prueban que variando la forma en que se dispongan los aisladores podemos encontrar un diseño que optimice la distribución de voltajes en dichos aisladores.

Se debe tener en cuenta que este análisis es manual, y por lo tanto no se han tomado muchos parámetros en consideración debido a la complejidad del cálculo que llevaría realizarlos. Algunos de los parámetros que se han omitido son, por ejemplo: constantes dieléctricas, tipo de material con el que se ha construido el aislador, el medio donde trabaja el aislador, tampoco se ha tomado en cuenta el costo. Esto ha sido así pues sólo se quiere saber si en realidad al variar el diseño es posible encontrar la solución al problema propuesto. Como se ha visto de los resultados preliminares, es posible crear un arreglo donde los voltajes estén distribuidos equitativamente, aunque se está lejos de valores reales. Se necesita trabajar con un programa comercial de elemento finito, el

cual nos permita incluir todas las variables, para así tener una idea más completa de los resultados en nuestro modelo. El paquete de elemento finito esta hecho para trabajar con la clase de problemas que se presentan en nuestra investigación. De ahí se podrá mirar y comparar los resultados con los diseños existentes en el mercado para comprender si su aplicación amerita un cambio sustancial en los diseños comerciales existentes.

Como se ha observado, solamente se ha trabajado en la parte eléctrica sin tener en cuenta la parte mecánica. Al terminar la investigación esperamos poder dar algunas recomendaciones al respecto, también hacer otras comparaciones a que de lugar (como por ejemplo con otra clase de aisladores) y ver que tan conveniente es el diseño que se obtenga.

3.3 Análisis de la variación de voltajes utilizando cuatro aisladores

Se realizará la simulación con un arreglo de cuatro aisladores (se enumeran de la línea a tierra) donde se ha variado su forma dentro de la cadena de aisladores para observar el resultado realizado manualmente con respecto al efectuado con el programa QF (Quick Field). Por motivos de la complejidad de trabajar con matrices tan grandes sólo se realizo en forma manual el arreglo de cuatro aisladores que en este caso fue el de la figura 3.9. Otros casos fueron hechos con el programa QF. Dado que la forma de realizar los cálculos es similar, se toma el arreglo que mejor comportamiento presentó y se le realizó el cálculo manual, para mayor entendimiento de la forma como se realizó el trabajo con los arreglos de cuatro aisladores. Todas las figuras que aparecen son explicadas con mas detalle en el apéndice B.

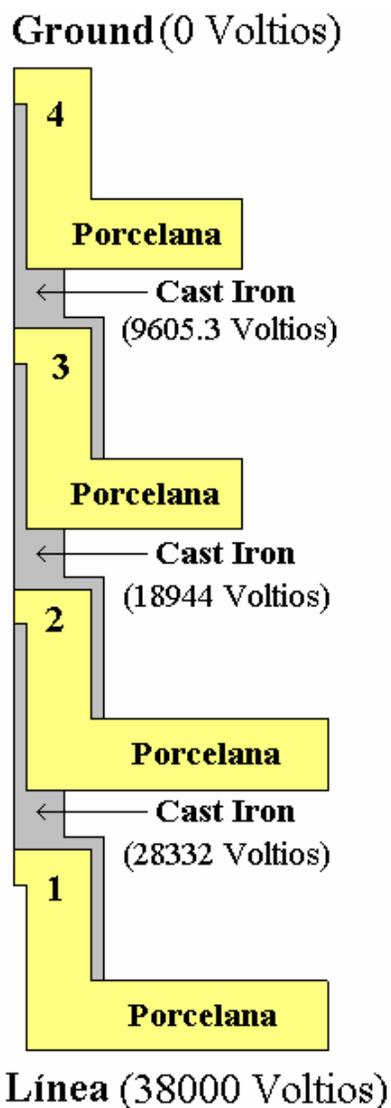


Figura 3.9. Variación del largo de los dos primeros aisladores (de línea a ground)

Como se puede observar en la figura 3.9 ha variado los dos primeros aisladores (de línea a ground) mostrando un valor muy cercano a los valores esperados (entre el aislador 1 y 2 lo esperado es 28500 Voltios) los cuales son mostrados en la tabla 3.3. Como se podrá observar esta disposición hace que los valores de voltajes se distribuyan más equitativamente que las variaciones que se verán a continuación. Esta variación es la más cercana a lo deseado, eso significa que el diseño de una cadena de aisladores al menos los dos primeros

(para el caso de cuatro aisladores) deben ser más robustos que los demás para así poder tener una mejor distribución del potencial. También se realizó el cálculo manual de este arreglo obteniéndose los siguientes valores: entre el aislador 1 y 2 28882 Voltios, entre el aislador 2 y 3 19594 Voltios y entre el aislador 3 y 4 10105.3 Voltios, se observa que los valores son muy cercanos al dado por QF es por eso que se trabaja con los valores de QF, este ejemplo es solo para mostrar su cercanía.

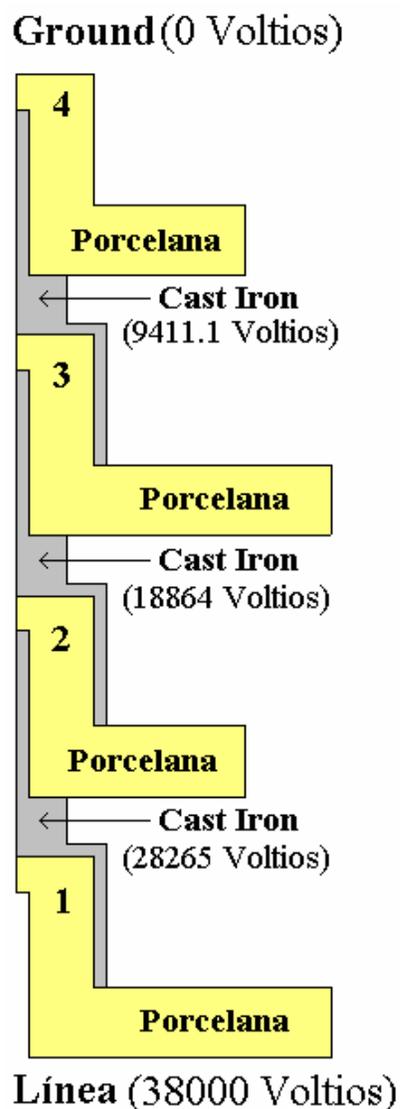


Figura 3.10. Variación del largo del primer y tercer aislador (de línea a ground)

En el arreglo mostrado en la figura 3.10 los valores se han alejado un poco aunque siguen estando bastante cerca de los valores deseados (por ejemplo entre el aislador 1 y 2 lo esperado es 28500 Voltios). Se nota que al colocar un aislador más grande que el primero el valor de voltaje tiende a equilibrarse, aunque el segundo aislador es más pequeño y el tercero es más grande. Es el primero el que hace que el voltaje sea más o menos equitativo como veremos en otros arreglos, si el primero es más pequeño no obtendremos valores de voltaje razonables.

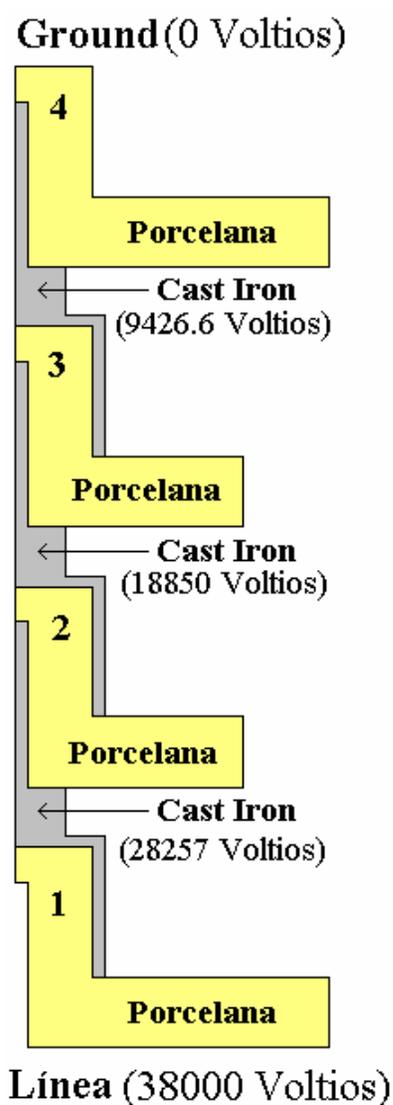


Figura 3.11. Variación del largo del primer y cuarto aislador (de línea a ground)

Nuevamente, en el arreglo mostrado en la figura 3.11 los valores se siguen alejando, persistiendo aun la cercanía de los valores esperados (entre el aislador 1 y 2 lo esperado es 28500 Voltios). De nuevo, aunque se varió el primer y cuarto aislador esta variación no produjo ningún cambio significativo. Por el contrario, el valor se aleja aún más de lo ideal, pero se sigue comprobando que el tener un aislador más robusto soportando la línea este tiende a distribuir más uniformemente el potencial de la cadena de aisladores.

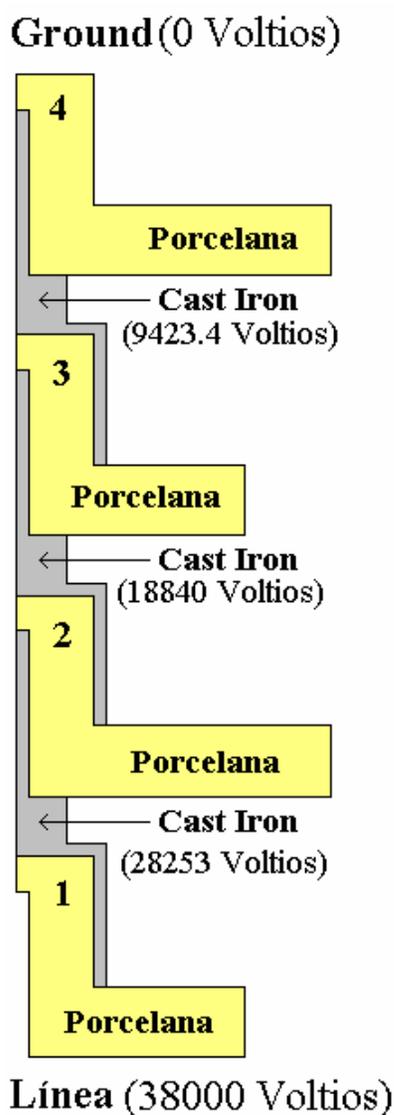


Figura 3.12. Variación del largo del segundo y cuarto aislador (de línea a ground)

En la figura 3.12 los valores hallados se han alejado de los valores deseados (por ejemplo entre el aislador 1 y 2 lo esperado es 28500 Voltios). Aunque hubo una variación, donde el primer aislador ya no es bastante robusto, el valor de voltaje obtenido es un poco razonable pues el segundo aislador es ahora el más robusto, y esto ayuda en la distribución. Sin embargo los valores obtenidos con este arreglo se alejan y en nada mejoran a la distribución que deseamos.

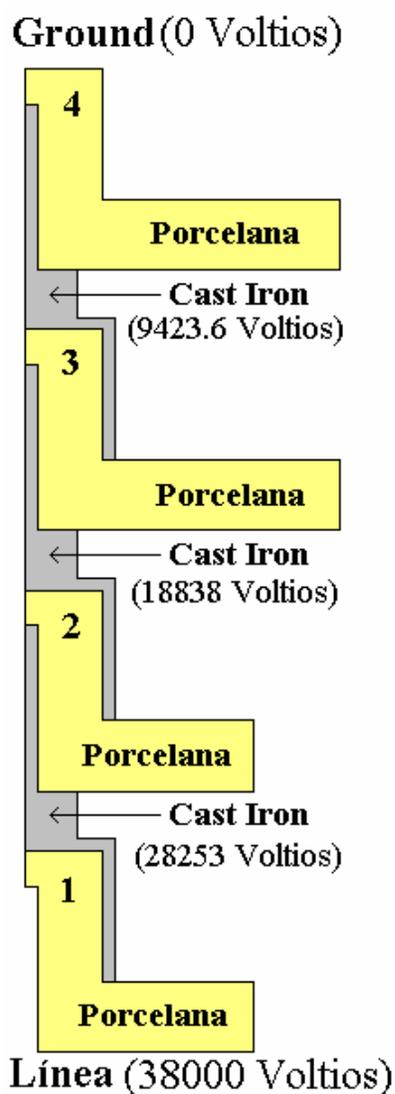


Figura 3.13. Variación del largo del tercer y cuarto aislador (de línea a ground)

En la variación mostrada en la figura 3.13, en donde los dos últimos aisladores son más robustos, no ocurre nada con el voltaje pues los valores observados (entre el aislador 1 y 2 lo esperado es 28500 Voltios) son muy similares a los mostrados en la figura 3.13. El haber hecho este cambio no ayudó al equilibrio del voltaje. Se observa entonces que el colocar un aislados más pequeño al principio no ofrece ninguna ayuda para poder equilibrar el voltaje, por lo tanto se aleja del voltaje que se desea obtener.

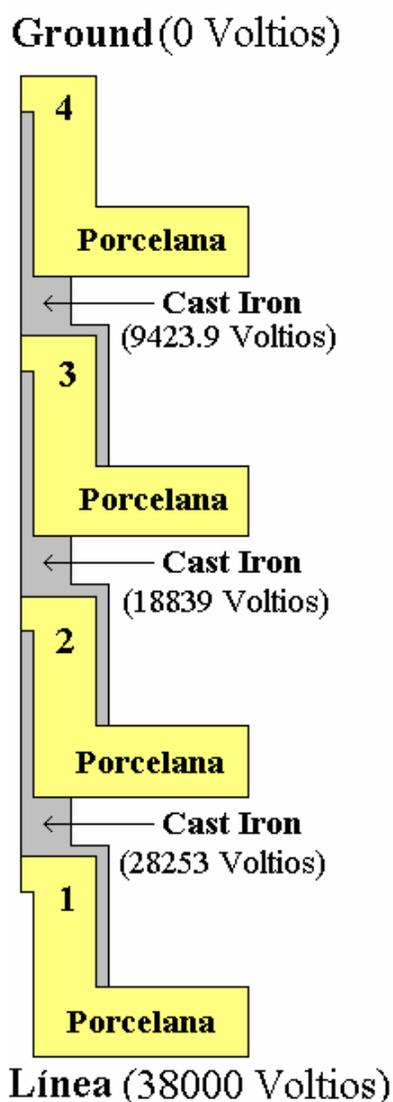


Figura 3.14. Cadena de aisladores de cuatro unidades sin ninguna variación

En el arreglo mostrado en la figura 3.14 no se hace ninguna variación y se observa que los valores de voltaje son bien parecidos (entre el aislador 1 y 2 lo esperado es 28500 Voltios) a los obtenidos en los dos arreglos anteriormente vistos (figura 3.12 y figura 3.13). Aquí se muestra la distribución que hay en una cadena de aisladores donde todos son iguales y el comportamiento del voltaje no es equitativo. Estos valores son los que se obtienen en una cadena común y son comparables con otros diseños.

Valores esperados entre cada aislador	Entre 1 y 2 28500 Volts	Entre 2 y 3 19000 Volts	Entre 3 y 4 9500 Volts
Valores calculados entre cada aislador			
Figura 3.9	28332 Volts	18944 Volts	9605.3 Volts
Figura 3.10	28265 Volts	18864 Volts	9411.1 Volts
Figura 3.11	28257 Volts	18850 Volts	9426.6 Volts
Figura 3.12	28253 Volts	18840 Volts	9423.4 Volts
Figura 3.13	28253 Volts	18838 Volts	9423.6 Volts
Figura 3.14	28253 Volts	18839 Volts	9423.9 Volts

Tabla 3.3. Valores de voltaje encontrados en los diferentes arreglos, comparados con los deseados

En la tabla 3.3 se resume el valor de los voltajes hallados, los cuales podemos comparar entre sí observando que el arreglo más significativo fue el mostrado en la figura 3.9. En dicha figura se muestra que el valor de voltaje tiende a repartirse en forma equitativa. También podemos observar que los valores de voltaje hallados en los arreglos mostrados en la figura 3.12, la figura 3.13 y la figura 3.14 (en este arreglo no hubo cambios) no equilibran los voltajes. Además se puede decir que sus valores son iguales aunque hubo una variación en los arreglos mostrados en la figura 3.12 y figura 3.13. Esos valores son iguales como si no se hubiera variado pues comparados con el arreglo de la figura 3.14 son los mismos.

Se concluye entonces que variando los aisladores mas cercanos a la línea (haciéndolos más robustos) obtenemos una mejor tendencia a equilibrar los voltajes en la sección donde se unen, demostrando así que al variar la forma de un aislador (cercano a la línea con respecto a los otros) se puede también variar el voltaje que soporta dentro de una cadena de aisladores.

Capítulo 4

Simulación y resultados

4.1 INTRODUCCIÓN

En la investigación que aquí se reporta, hemos propuesto el uso del Método de Elemento Finito (FEM, por sus siglas en inglés) como herramienta para simular la distribución de voltajes en aisladores de suspensión. El propósito principal de la investigación es el de poder proponer cambios en el diseño de dichos aisladores, una vez sean creados y validados los modelos. En esta tesis usaremos un caso fundamental de aisladores de suspensión para poder hacer la introducción al tema de FEM.

4.2 Selección del programa utilizado

Se seleccionó el programa Quick Field, el cual es un paquete de Análisis de Elementos Finitos muy eficaz para la simulación y visualización de los procesos electromagnéticos, térmicos y para diseños de tensión. El paquete combina un conjunto de módulos de análisis basados en las últimas tecnologías de resolución con un pre procesador muy amistoso y un post procesador muy potente. La versión de programa que hemos utilizado es una versión de estudiante que tiene muchas limitaciones lo cual nos imposibilita llegar más allá de algunas metas propuestas, como es el caso de hacer la simulación con un aislador mas detallado. Además se usó, el programa ATP (Alternative Transient Program) para validar los resultados hallados con QF.

4.3 Simulación en el ordenador de casos hechos a mano usando el programa Quick Field

En las figuras que se obtienen en Quick Field se han colocados algunas explicaciones para ayudar al entendimiento de las mismas ya que, el programa no las provee. Dichas explicaciones se realizaron a mano y han sido hechas en todas la figuras que se han tomado de QF y de ATP para un mayor entendimiento. Lo mismo se realizo para el diseño de los aisladores, como se puede observar en la figura 4.1.

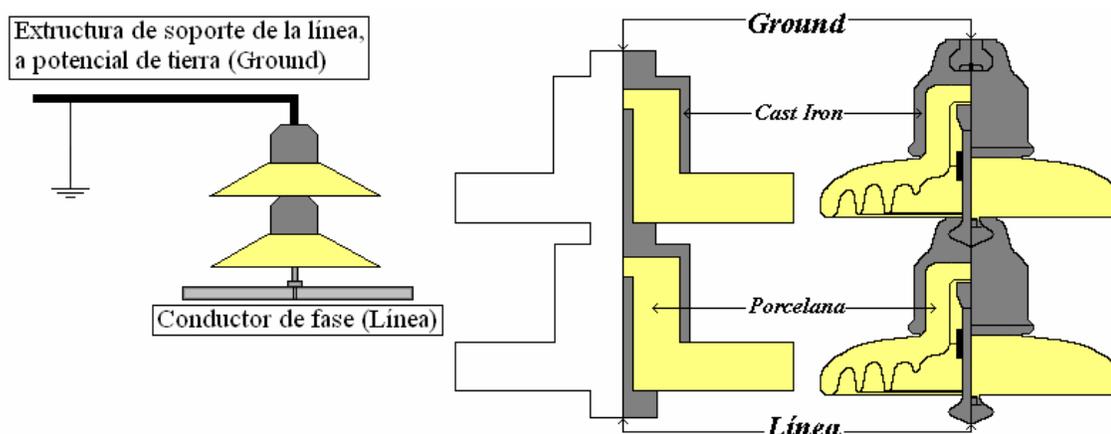


Figura 4.1. Equivalencias del diseño de los aisladores

En este capítulo validaremos nuestros cálculos realizados manualmente con el programa seleccionado. Trabajamos con dos aisladores sin hacer ningún cambio en su forma, dando como resultado 9335.1 voltios mostrado en la figura 4.2. Como se observa, el resultado tiene la misma tendencia en voltios que el encontrado en forma manual, donde su valor fue de 0.4121 p.u. (7829.9 voltios) mostrado en la figura 3.4, donde el valor esperado en la parte donde se unen los dos aisladores no es la mitad del voltaje aplicado.

Como puede observarse en la parte superior, (Ground) es donde se sujeta el conjunto de aisladores a la torre. En la parte inferior (Línea) es donde se sujeta el conductor de fase, obteniéndose la representación mostrada en la

figura 4.1. Esto se realizó para facilitar la comprensión del dibujo y poder llevarlo al programa ya que es la manera mas fácil de hacerlo, la razón para no hacerlo en su forma idéntica fue limitaciones de la versión estudiantil de QF.

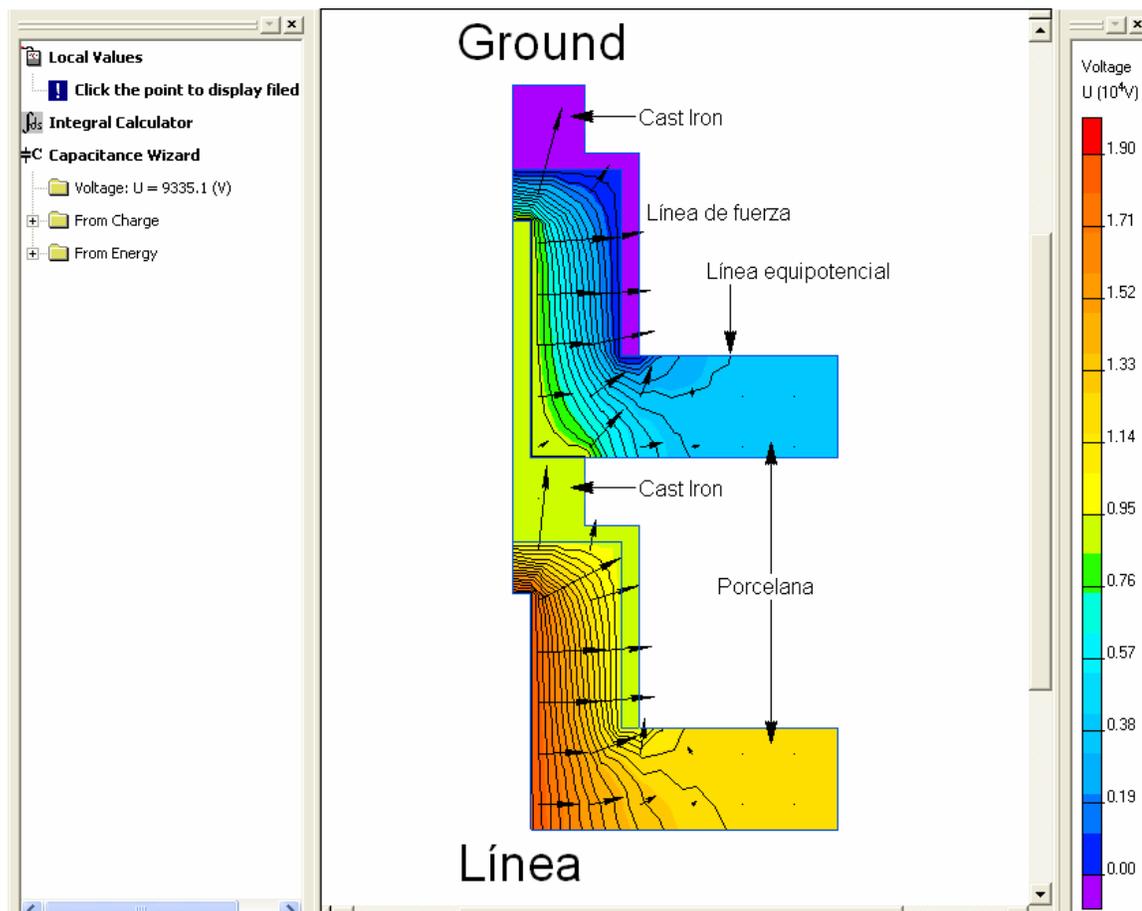


Figura 4.2. Resultado del voltaje en la unión de los dos aisladores

En la figura 4.2 parte izquierda (donde se unen los dos discos) podemos observar el valor de voltaje que se obtiene en el cast iron que es de 9335.1 voltios, lo idóneo sería de 9500 voltios, la mitad del voltaje total. Notamos que no hay una distribución uniforme del voltaje en los dos aisladores observados. En la columna del centro vemos las líneas de fuerza (observamos que las líneas de fuerza terminan con flechas, indicando su carácter vectorial, las cuales son perpendiculares a las líneas equipotenciales) que empiezan a la izquierda,

donde se sujeta la línea. En la región donde se sujeta el conductor (línea) están más juntas (donde se engancha la línea y en las esquinas, donde se forman ángulos de 90° , por resolución no se ven en el gráfico) que en la región que esta a la derecha que es donde se observa el cast iron. Esto significa que el campo eléctrico es más intenso del lado izquierdo, y disminuye su intensidad cuando nos movemos hacia el lado derecho (donde se une la porcelana con el cast iron). Lo mismo se observa con las líneas equipotenciales, donde las que están más a la izquierda tienen un valor de potencial mayor que las que se encuentran a la derecha (cuando nos movemos en dicho sentido). Cualquier línea equipotencial representa puntos de potencial constante, como su nombre lo dice, o lo que es lo mismo, se trata de una curva de nivel. De lo anterior se observa que el mayor stress se produce en la parte donde se sujeta la línea y va disminuyendo hacia la parte de la torre (en este caso "ground"). En la columna de la derecha observamos una escala de voltaje donde nos muestra el valor de voltaje que se da en los aisladores por sus tonos de color. Se puede notar que las líneas se unen cada vez más en áreas donde el diagrama tiene ángulos de 90° .

En las nuevas disposiciones mostradas en las figuras 4.3 y 4.4, en donde se ha variado el largo de un aislador, corroboramos la misma tendencia en los valores que se hallaron en la parte manual donde se obtuvo 0.4893 p.u. (9296.7 voltios) y 0.4999 p.u. (9498.1 voltios), el voltaje en la unión de los aisladores varía, eso lo podemos observar en el voltaje obtenido que es de 9363.7 voltios y 9334.9 voltios respectivamente. Hay que tener en cuenta que estos valores no son exactos, pues en el trabajo hecho a mano no se tuvo en cuenta las dimensiones del aislador y sólo se realizó para mostrar los diferentes cambios que se dan en un aislador según se modifica la geometría (además de aprender a usar el método de elemento finito). Similarmente a los casos anteriores observamos el mismo comportamiento de las líneas de fuerza las cuales son más fuertes en la parte izquierda (donde se sostiene la línea) y se dirigen hacia

la parte derecha (donde se encuentra el cast iron), aunque no muestran visualmente un cambio significativo los valores de voltaje si lo hacen, percibiéndose un cambio que aunque parece mínimo es muy notorio en dichos valores de voltaje.

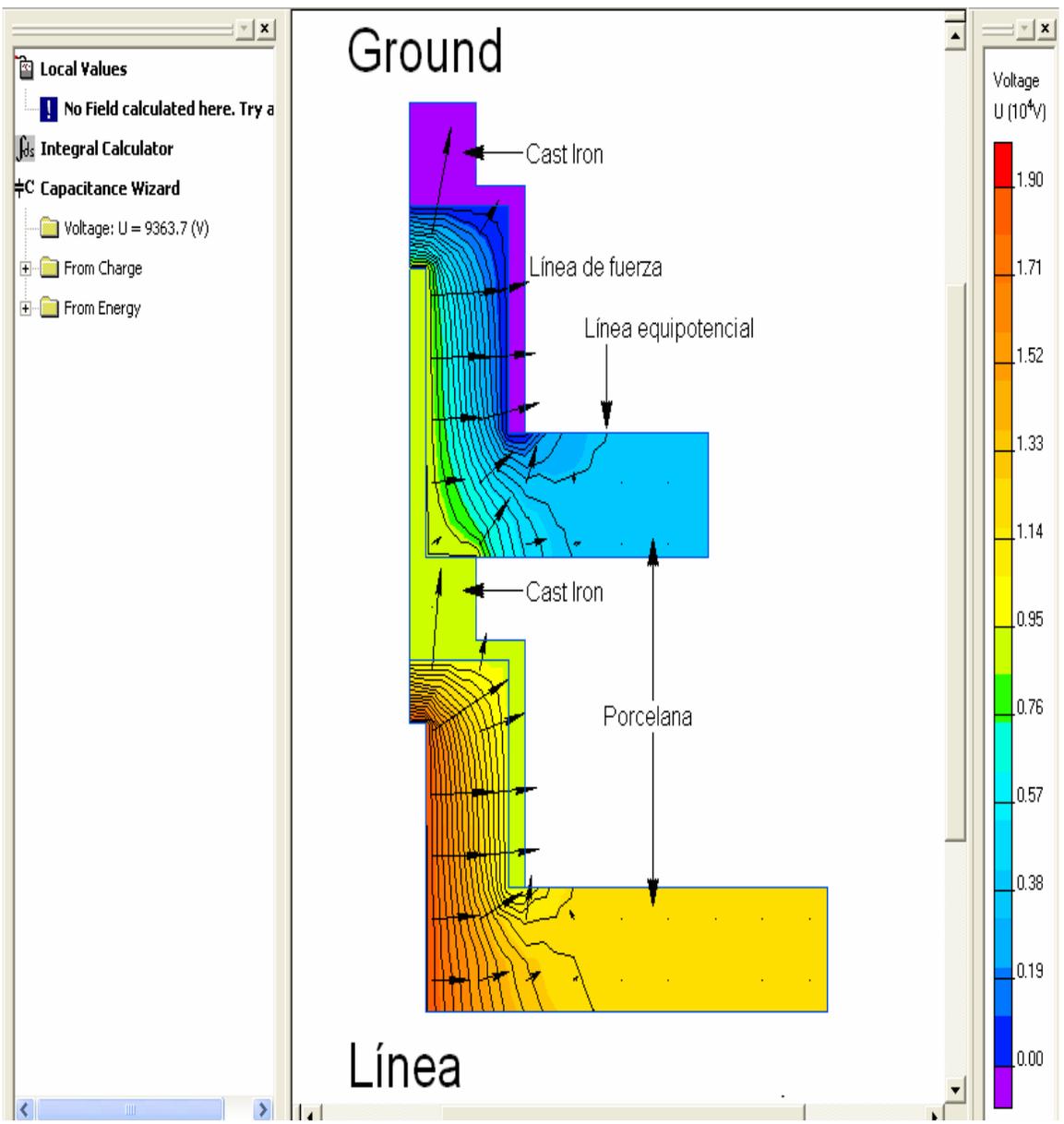


Figura 4.3. Voltaje en la unión de los aisladores variando el largo del aislador inferior

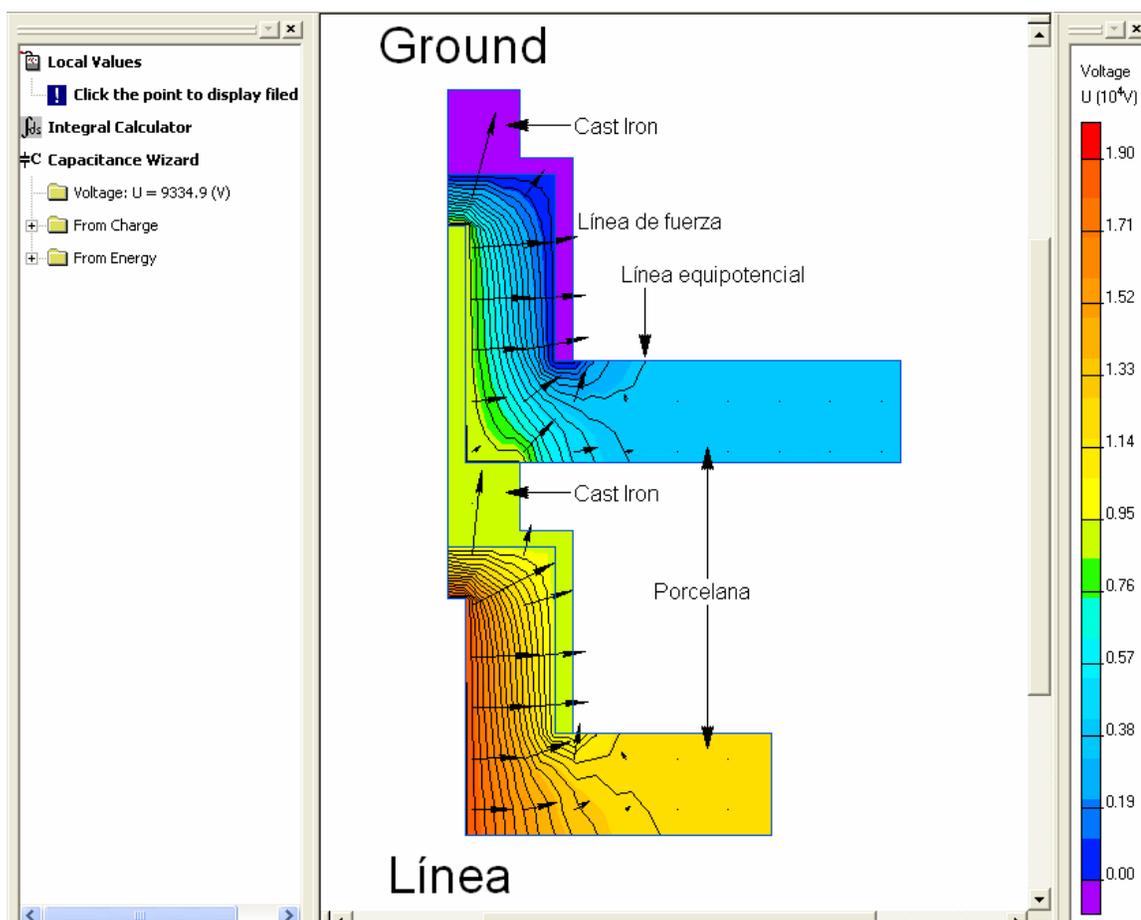


Figura 4.4. Voltaje en la unión de los aisladores variando el largo del aislador superior

Nuevamente en las figuras 4.5 y 4.6 vemos las variaciones del voltaje en la unión de los aisladores 9376 voltios y 9442 voltios respectivamente, comparada con los cálculos hechos manualmente donde se obtuvo .5 p.u. (9500 voltios), como se muestra en las figura 3.7 y 3.8. Estos valores de voltaje obtenidos variando la geometría de los aisladores se acerca mucho más al valor de voltaje deseado. Hay que anotar que el valor que se muestra no es exactamente la mitad, pues aunque se use un programa de computador el tener un valor exacto es casi imposible debido a muchos factores, los cuales no se tienen en cuenta para poder hacer más fácil la simulación. Las líneas de fuerza y las líneas equipotenciales siguen con la misma tendencia hechas en las variaciones anteriores.

Lo que se ha querido mostrar con estas diferentes configuraciones es la viabilidad de tener un posible arreglo de los aisladores en una cadena, que podría contribuir al reparto equitativo de voltaje. Se muestra con las diferentes modificaciones que el valor del voltaje varía con el cambio de la forma del aislador, observándose un cambio sustancial en la distribución de voltaje.

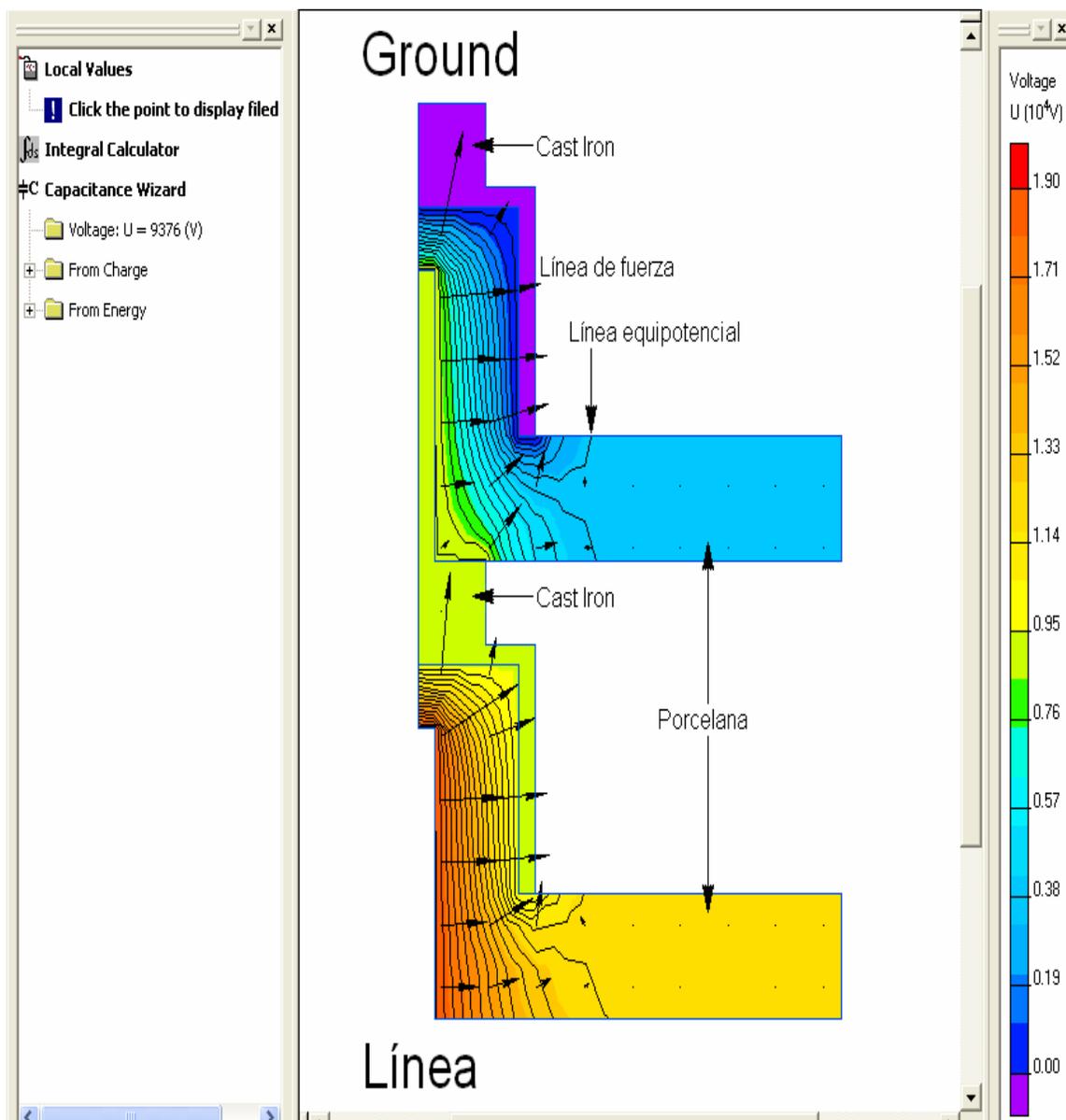


Figura 4.5. Voltaje en la unión de los aisladores variando el largo de ambos aisladores

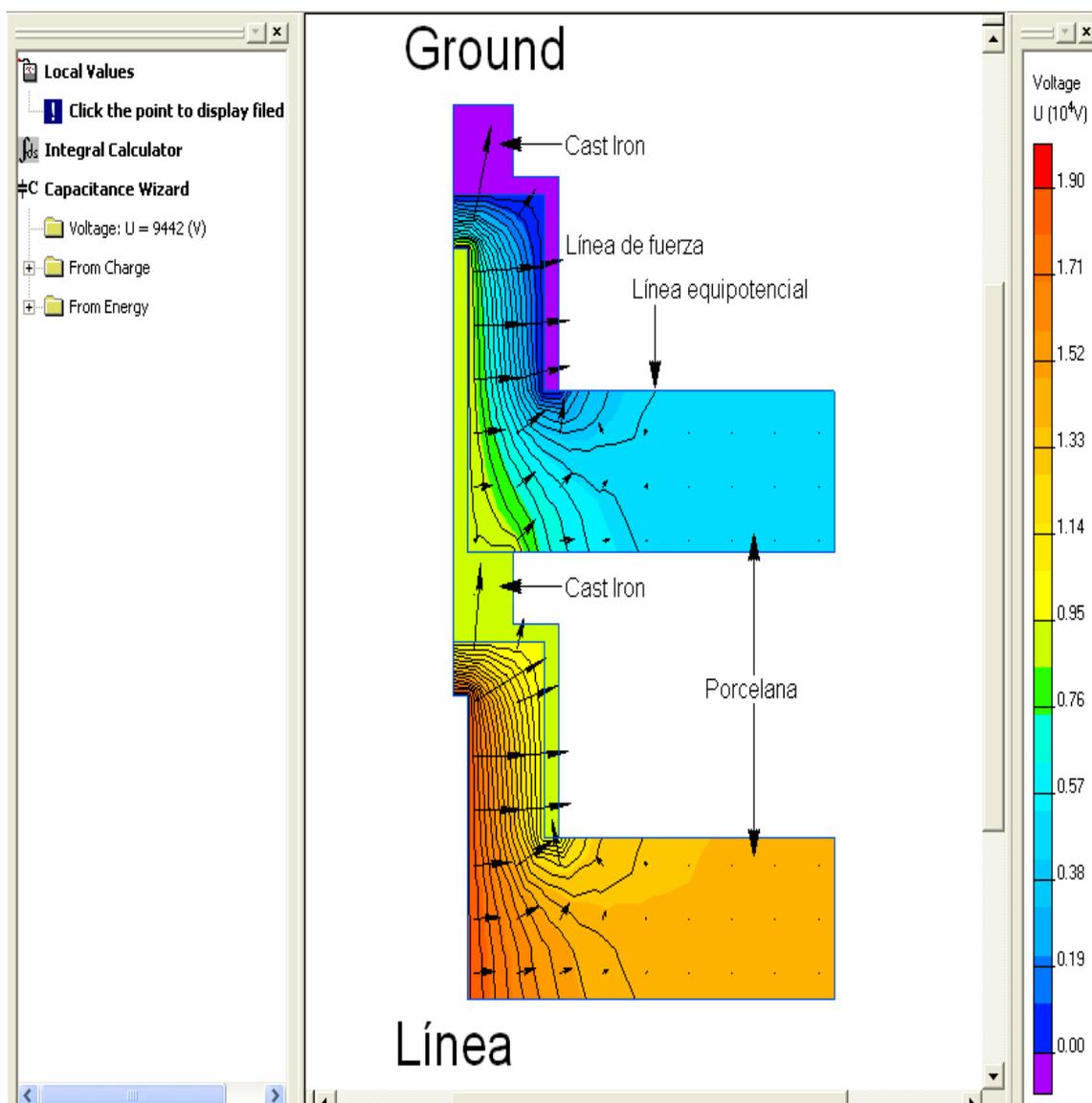


Figura 4.6. Voltaje en la unión de los aisladores variando el ancho de ambos aisladores

Cabe anotar que el voltaje aplicado a los aisladores para simular estos casos fue de 19000 voltios, el valor esperado en la unión de los aisladores es de 9500 voltios. El modelo de la figura 4.6 muestra un valor muy aproximado al deseado (9442 voltios) y valida el cálculo realizado manualmente. Como se dijo inicialmente no se puede esperar un valor exacto, debido a los factores anotados anteriormente, pero si podemos ver el cambio, y la tendencia en los resultados.

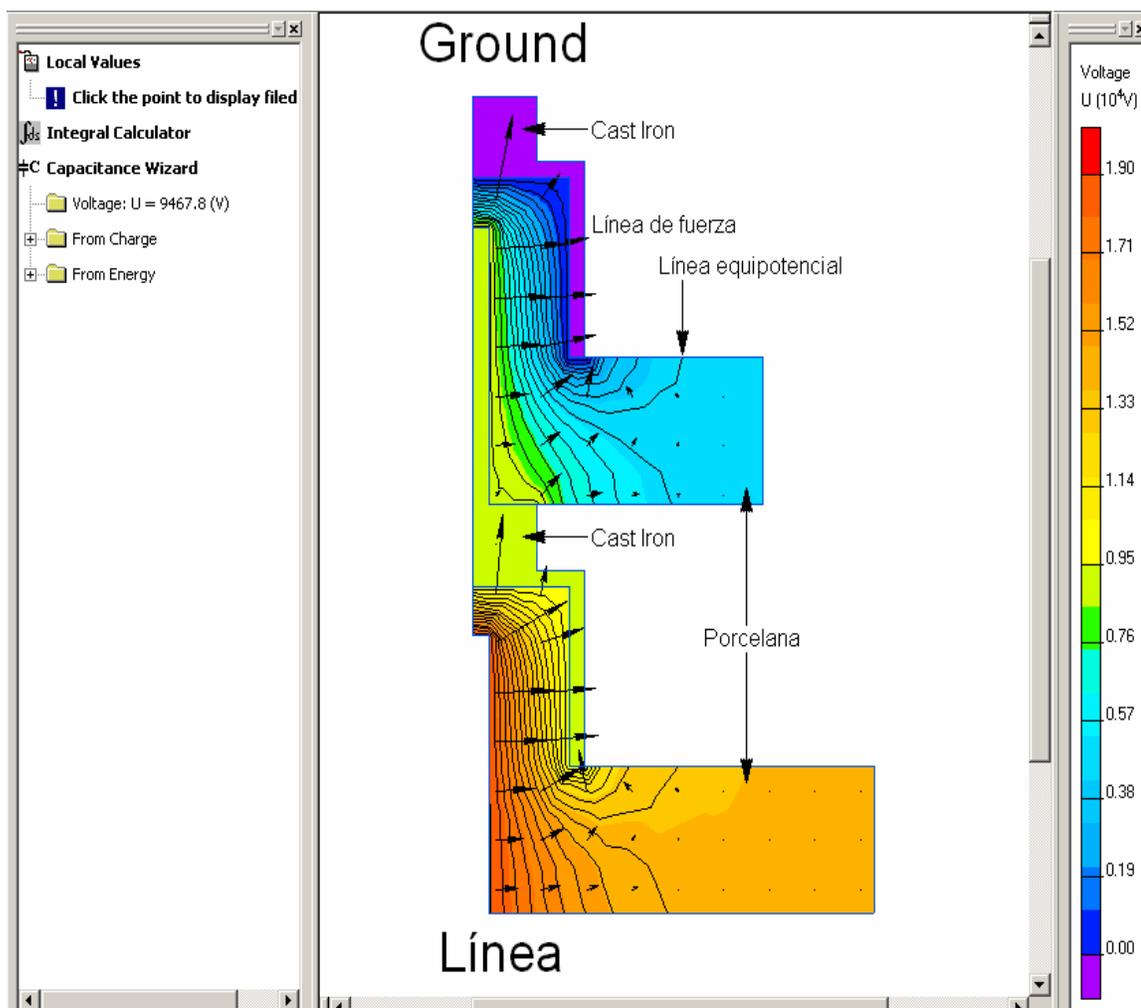


Figura 4.7. Voltaje en la unión de los aisladores variando el ancho del primer aislador y ancho y largo al segundo aislador

En figura 4.7 podemos observar que el primer aislador donde se sujeta la línea es más robusto. Cuando se realiza la simulación en QF vemos que el voltaje en la unión es de 9467.8 voltios algo más cercano a 9500 voltios que es el valor que esperamos obtener. Se nota entonces que haciendo al primer aislador más robusto obtenemos una mejor distribución de voltaje, las líneas de fuerza y las líneas equipotenciales siguen teniendo su extremo hacia las esquinas. Podemos concluir que donde se produce el mayor stress debemos colocar el aislador más robusto, tanto así que se podría disminuir aún más el otro aislador para tratar de equilibrar el voltaje y llegar al valor deseado.

4.4 Simulación en ATP para validar los resultados obtenidos en Quick Field

Validaremos ahora con el programa ATP los valores obtenidos en QF, para el caso base donde el valor en la unión de los aisladores no es la mitad del valor esperado. En el programa QF se ingresan los valores de voltaje y el programa proporciona los valores de capacitancias con las cuales se hace la simulación en ATP. El programa nos confirma que el valor del voltaje en verdad no es la mitad, que en la realidad es lo que sucede en una cadena de aisladores donde el aislador más próximo a la línea tiene el mayor estrés de voltaje.

Se realizaron dos simulaciones para comprobar este cambio, en el primer caso se realiza una simulación donde se observa que la distribución no es equitativa, que es lo que ocurre en la realidad, en el circuito se utiliza una fuente *DC* y luego otra *AC* para observar su comportamiento.

En el segundo caso la distribución es equitativa lo cual se logra variando el valor de C_1 para tratar de obtener el voltaje deseado (9500 voltios) en la parte donde se unen los dos aisladores, también se utiliza una fuente *DC* y luego otra *AC* para observar su comportamiento.

Con estas simulaciones se demostrarán los cambios que ocurren en una cadena de aisladores cuando se varía el valor de capacitancia de uno de los discos del arreglo.

4.4.1 Simulación con una fuente DC donde el voltaje no es equitativo

Esta simulación se realiza con una fuente *DC* y se utiliza los valores obtenidos con el programa QF. Se comprueba con esta simulación que el voltaje soportado por el primer aislador ($C_1=10324.6364$ voltios) es mayor que los

segundos ($C_2 = C_3 = 8675.3636$ voltios), por lo tanto tienen un mayor estrés, como podemos observar en la figura 4.8. También se observa el valor de capacitancia obtenido mediante el programa QF con los cuales se realiza la simulación. Cabe anotar que los diagramas del circuito hechos en ATP son diferentes a los que se muestran en QF. En QF la línea se encuentra en la parte inferior y la tierra en la superior. En ATP se dibuja al contrario, la línea en la parte superior, esto puede causar confusión por eso se aclara el punto. También se observa el valor de voltaje de los nodos obtenido en ATP cuando se utiliza los valores de capacitancia que aparecen en la grafica. Dichos valores de capacitancia son obtenidos del post-procesador de QF.

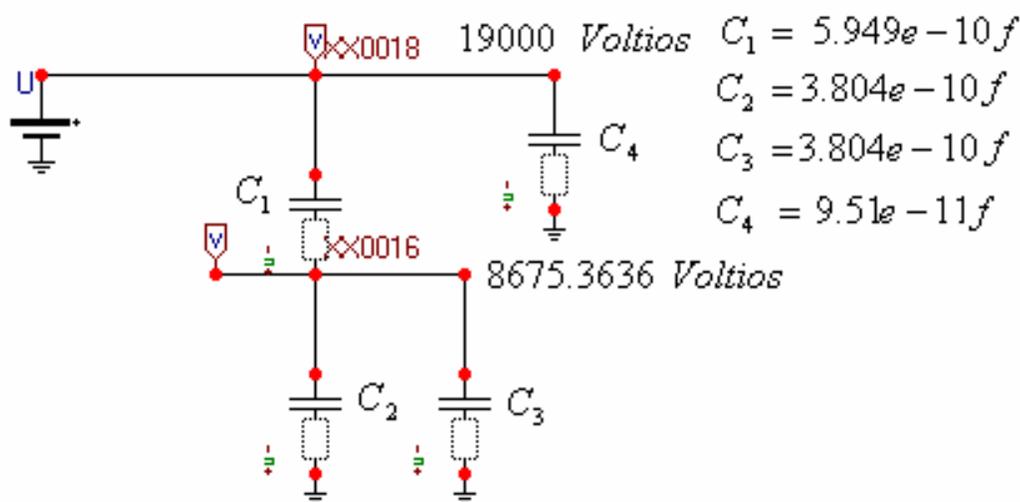


Figura 4.8. Modelo de aisladores con fuente DC donde no hay distribución equitativa de voltajes

En la figura 4.9 se observa la gráfica de voltajes obtenida del arreglo realizado en la figura 4.8. La gráfica presenta en el eje Y el voltaje, mientras el eje X los segundos. Como se podrá observar el valor del nodo $XX0016$, donde se unen los aisladores no es precisamente la mitad del valor aplicado a los aisladores, se observa un valor de 8675.3636 voltios, cuando la mitad es de

9500 voltios y debería ser este valor. Esto comprueba la distribución no uniforme del voltaje tal como se muestra en las simulaciones de la sección 4.3.

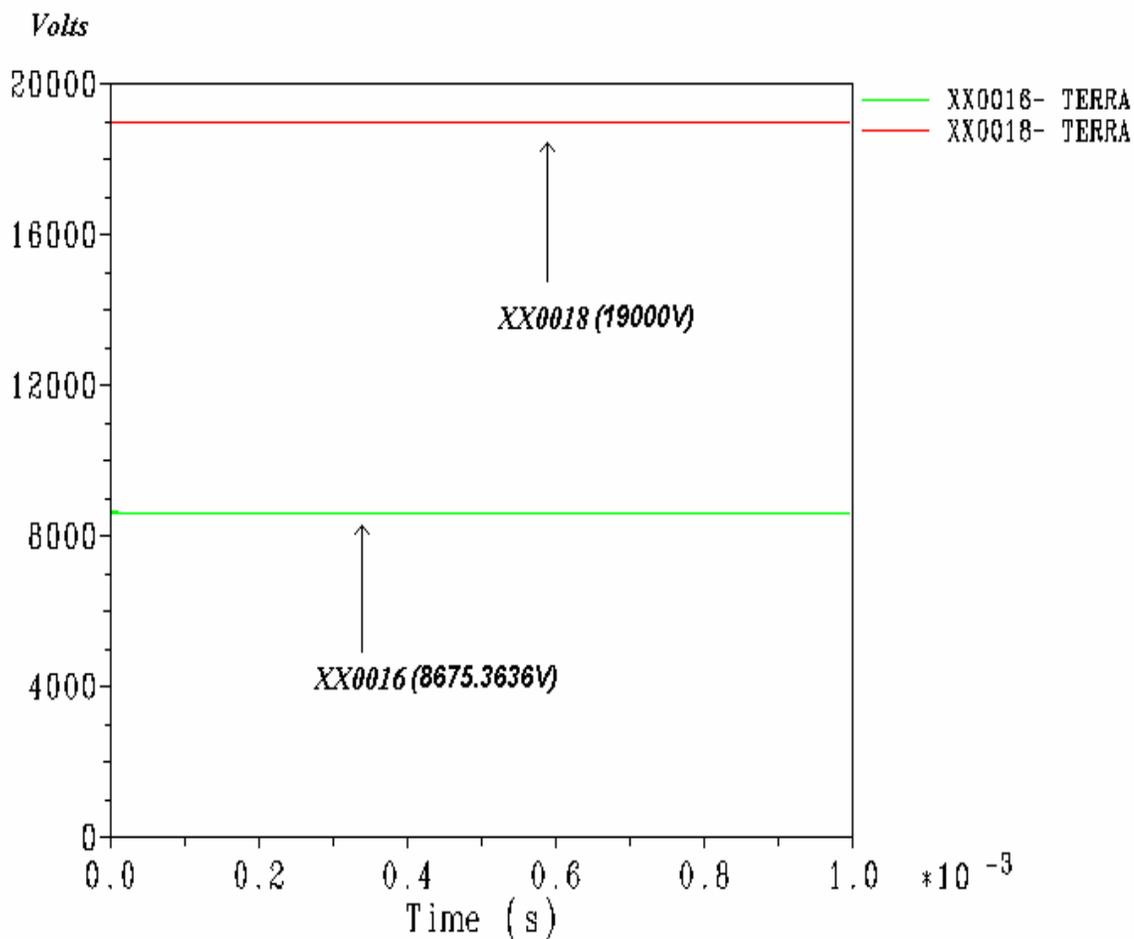


Figura 4.9. Graficas de voltajes DC no equitativos

4.4.2 Simulación con una fuente AC donde el voltaje no es equitativo

En esta simulación se ha tomado una fuente sinusoidal para ver el comportamiento de la distribución de voltaje, similar al caso anterior los valores de capacitancia utilizados son mostrados en la figura 4.10 y el resultado del voltaje obtenido también es observado,

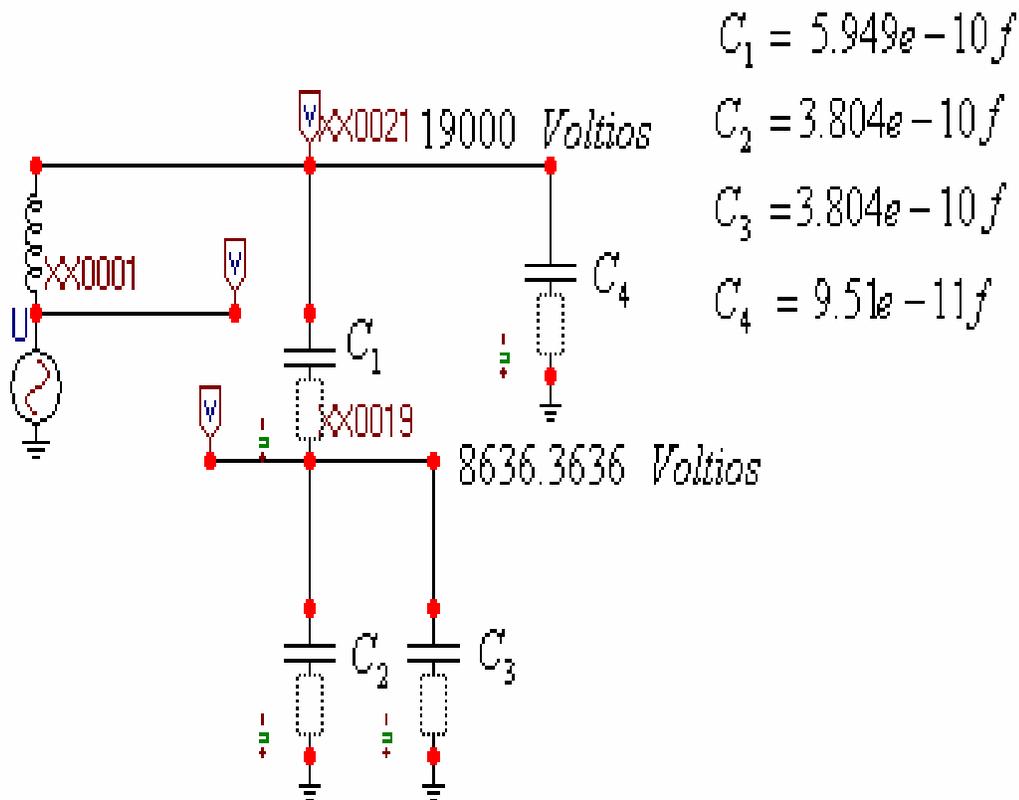


Figura 4.10. Modelo de aisladores con fuente AC donde no hay distribución equitativa de voltajes

En la figura se muestran los valores de voltaje obtenidos utilizando la fuente AC, pudiendo observar los valores de XX0021 (19000 voltios) y de XX0019 (8636.3636 voltios). Con estas gráficas se desea mostrar el comportamiento de una cadena de aisladores donde cada elemento es igual y al conjunto no se le hace ninguna modificación, mostrando como el voltaje no es dividido equitativamente. Se observa los valores de capacitancia con los que se realizó el modelo.

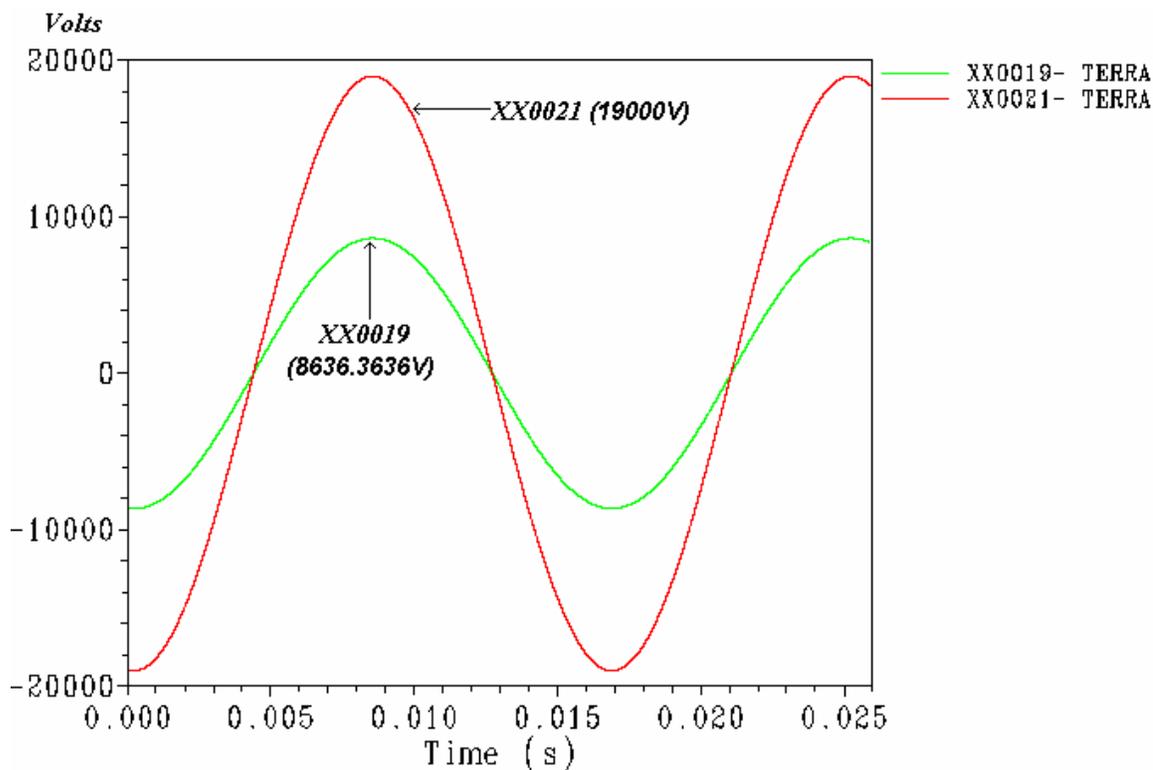


Figura 4.11. Graficas de voltajes AC no equitativos

En la figura 4.11 se muestra la forma de onda obtenida al utilizar una fuente *AC*. Confirmamos la tendencia obtenida en el diseño con una fuente *DC* y con los valores hechos a mano.

4.4.3 Simulación con una fuente DC donde el voltaje es equitativo

Ahora variaremos la configuración de la cadena donde no todos los aisladores son del mismo tamaño, observaremos su comportamiento y como se realiza la distribución de voltaje. En este caso mostrado en la figura 4.12 donde se ha variado el capacitor C_1 (que equivale a cambiar la forma del aislador, obsérvese que C_1 es 690 pf en este caso, comparado con 594.9 pf en el caso de la figura 4.10). Se obtiene el valor de 9500 voltios que es nuestro valor deseado, también se muestra los valores de capacitancia que dieron lugar al resultado obtenido.

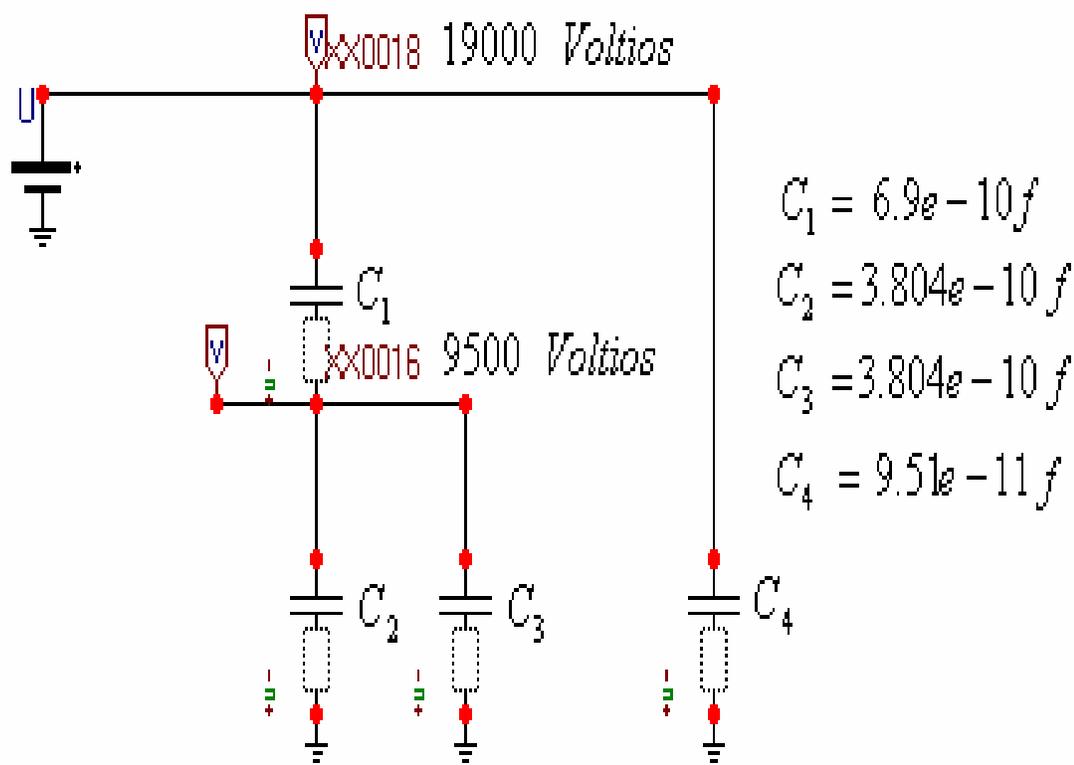


Figura 4.12. Modelo de aisladores con fuente DC donde hay distribución equitativa de voltajes

En la figura 4.13 se observan las gráficas de las ondas de voltaje del nodo $XX0016$ (9500 voltios) y el nodo $XX0018$ (19000 voltios) obtenidos al utilizar una fuente DC de voltaje y los valores de capacitancia utilizados. Se observa la variación en el valor del capacitor C_1 , con este valor obtenemos los valores de voltaje que deseamos.

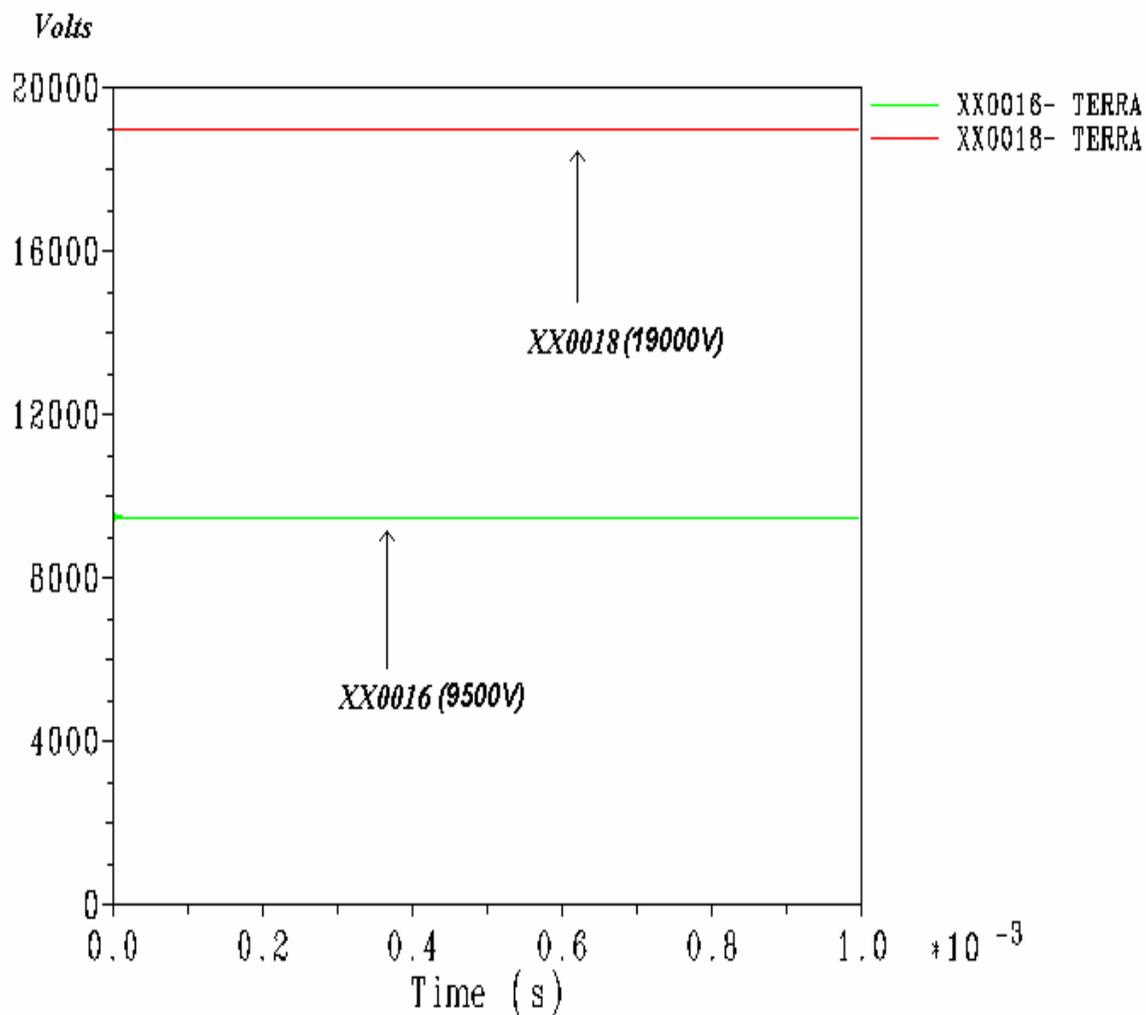


Figura 4.13. Graficas de voltajes DC equitativos

4.4.4 Simulación con una fuente AC donde el voltaje es equitativo

Similar al caso anterior en la figura 4.14 se ha reemplazado la fuente *DC* por una fuente *AC* para observar el comportamiento del sistema bajo la condición de la fuente, observándose los valores de voltaje de los nodos *XX0019* (9500 voltios) y *XX0021* (19000 voltios) mostrados en la figura, los valores de capacitancias también son mostrados en la figura 4.14.

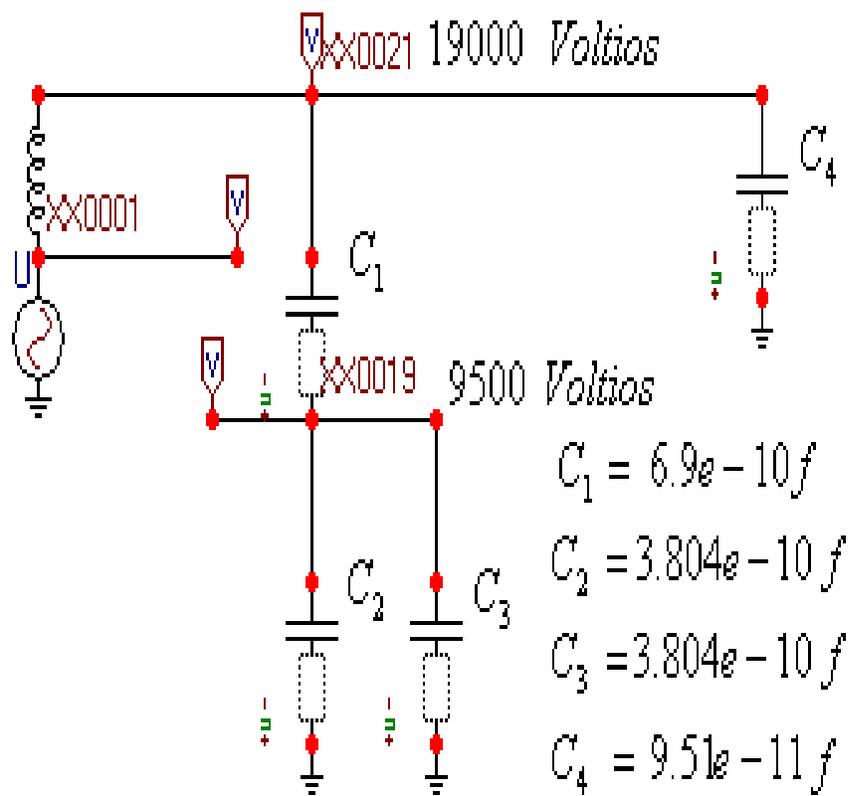


Figura 4.14. Modelo de aisladores con fuente AC donde hay distribución equitativa de voltajes

Se muestran en la figura 4.14 el cambio realizado en el capacitor C_1 , el cual en todas las simulaciones fue el único que se altero debido a que en los demás aisladores dichos valores de capacitancia eran constantes. Es importante notar que el programa QF no proporciona la información del valor en el capacitor C_1 . Dicho valor del capacitor C_1 fue hallado mediante el método de prueba y error ('trial & error') de forma tal que se obtenga el resultado deseado. Esto se debe a que en teoría, si los discos aisladores son geoméricamente idénticos, su capacitancia individual también lo será. Al tener una capacitancia diferente en uno de los discos (o su representación, figura 4.14) estamos variando su geometría, que es uno de los objetivos de esta investigación.

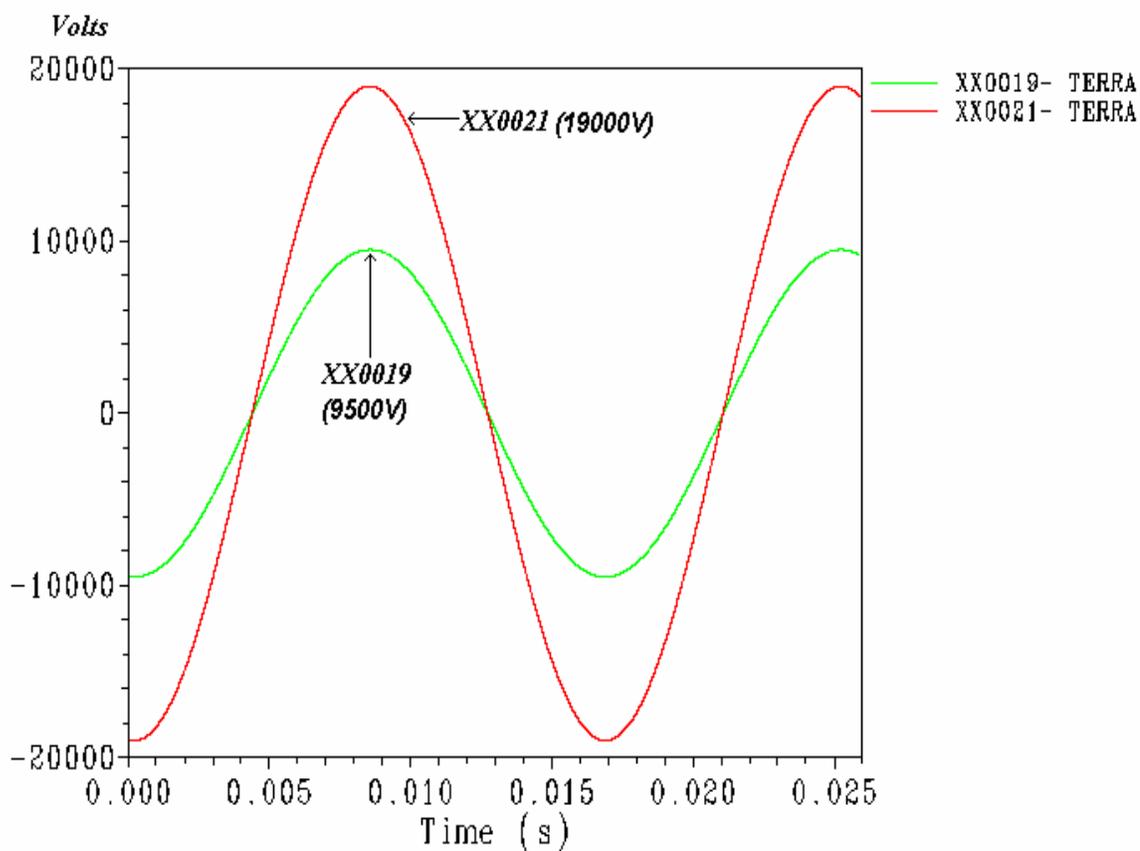


Figura 4.15. Graficas de voltajes AC equitativos

En la figura 4.15 se muestra los valores de las ondas obtenidas utilizando la fuente de voltaje AC .

Se debe aclarar que se ha variado en todos los arreglos al capacitor C_1 pues este es el que mayor stress tiene y es al cual se debe de dar robustez según lo observado en las simulaciones de QF, ver figuras 4.8, 4.10, 4.12 y 4.14. En este caso aumentamos su capacitancia. Se trató de que las simulaciones tanto manuales como las de los distintos programas se utilizaran los mismos valores de capacitancias, pero debido a las razones explicadas anteriormente puede haber algunas desviaciones. De todas maneras lo que se quiere mostrar y validar con los datos obtenidos de esta forma es que cumplen con nuestro objetivo de lograr una distribución del voltaje.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

En ingeniería eléctrica la distribución del campo eléctrico y magnético son siempre variables que poseen una interrogante para poder tener un buen criterio a la hora de la toma de decisiones. Esto ocurre cuando se va a desarrollar algún proyecto, montaje o mantenimientos de sistemas eléctricos. Es importante tener un buen conocimiento sobre dichos campos, cuando se desea realizar la evaluación de los distintos esfuerzos eléctricos y también magnéticos que se presentan en los aisladores de suspensión. El conocimiento de los esfuerzos eléctricos y magnéticos es de vital importancia para proponer soluciones o modificaciones a equipos en el sistema eléctrico.

El análisis teórico simplificado ha mostrado que es posible encontrar un diseño para una cadena de aisladores de suspensión en el cual la distribución en el valor de voltaje sea equitativa. Utilizando un programa de computadora, donde se pueda simular la situación, podremos acercarnos aún más a lo que se esta buscando. En este caso, mantener una distribución equitativa de los voltajes a través de una cadena de aisladores.

Utilizando el método de elemento finito se observa como es posible hacer variaciones en las configuraciones de los aisladores de suspensión para distribuir el valor de voltaje y llevar dicho valor a uno que es el deseado.

Todos los conceptos aquí planteados se hicieron a base de la aplicación de elemento finito en forma teórica simplificada, lo cual condujo a deducir que sí es posible obtener una configuración para una cadena de aisladores donde el voltaje se pueda distribuir uniformemente.

Para este estudio se utilizaron datos de entrada típicos que se consiguen en literatura, por lo cual es conveniente que estos valores sean obtenidos por métodos experimentales o numéricos. De esa forma se puede obtener resultados más reales del elemento bajo estudio.

Aunque en los programas no se tomaron en consideración las capacidades C_{pm} y K , los resultados obtenidos dan una idea muy aproximada a la distribución física del potencial, obteniéndose la mayor discrepancia en las unidades cercanas a tierra. Sin embargo este error es inapreciable comparado con las tensiones que soportan estos aisladores.

Según los resultados obtenidos con la variación de parámetros en las cadenas puede concluirse que los factores que de una u otra forma colaboran en la linealización de la distribución son: el aumento de capacidad entre cuenca y perno metálico de cada unidad, la disminución de la capacidad entre cada unidad y tierra. Por otra parte el aumento del número de aisladores de las mismas características incrementa la no-linealidad.

Para la distribución de potencial en una cadena de aisladores se deben hacer grupos de aisladores diferentes físicamente (pero compatibles mecánicamente) y por tanto de diferente capacidad propia que soporten relativamente un mismo nivel de tensión. De esa forma se disminuye la subutilización de algunas unidades de la cadena; esto presenta el inconveniente de alterar el diseño y la producción en serie de aisladores, con el consecuente aumento de los costos. Sin embargo, con la introducción de aisladores poliméricos, este tipo de diseño es posible y probablemente viable debido a que para dichos equipos poliméricos la producción es menos costosa.

La ventaja adicional de algunos arreglos como los mostrados en las figuras 4.3 y 4.4 es que proveen una trayectoria más larga al arco por lo que

proveerán un nivel de aislamiento básico (BIL por sus siglas en ingles) mayor. Esto significa que el “flashover voltage” es mayor que en un arreglo donde todos los discos son iguales.

Como ya se ha mencionado utilizando la limitación en el “software” no nos permitió hacer el diagrama exacto, de AutoCad. Esto limitó mucho el cambio geométrico de los aisladores. En esta investigación se pudo trabajar sólo con modelos simplificados de aisladores. Así se muestra en la figura 4.1.

Se puede deducir también que al hacerle variaciones al aislador también aumentamos su corriente de fuga. Al hacer la distancia de tierra a línea más extensa, sería una ventaja que se obtendría con algún diseño de esta índole.

Los valores hechos manualmente comparados con los obtenidos por QF defieren un poco entre sí, en el primer caso (cálculos manuales) no se tuvo ninguna información sobre el aislador. Además lo que se pretendía era conocer el método de elemento finito y si era posible variar los valores de voltaje. Para los valores dados en QF se tiene en cuenta su valor en mm, que también es aproximado ya que se trabaja con una versión estudiante del programa QF, en la cual no se nos facilito realizar el dibujo en su forma natural y con todas sus características. De todos modos los resultados tienden y confirman la variación en el diseño y por consiguiente variación en voltaje.

El método de Elementos Finitos constituye una herramienta muy útil para obtener la distribución de potencial en las diferentes partes de un aislador y determinar los puntos de concentración del campo eléctrico, con lo cual se pueden mejorar los diseños en la conformación de una cadena de aisladores. Este trabajo ha permitido encontrar un programa de computador útil como herramienta para el diseño de aisladores.

Se recomienda poder mejorar el análisis del circuito equivalente para incluir los efectos de las capacidades que por simplicidad fueron excluidas en este desarrollo.

Capítulo 6

Trabajos futuros

Se plantea como futuras realizaciones a partir de este trabajo, encontrar por medios computacionales los puntos donde se inicia el efecto corona y ver la influencia de este fenómeno en la variación de capacidad. Por tanto en la distribución de potencial en toda la cadena. Igualmente se espera poder mejorar el programa de circuitos equivalentes para incluir los efectos de las capacidades que por simplicidad fueron excluidas en este desarrollo.

Se deja la simulación de todos los arreglos presentados aquí para ser corridos con carga, lo mismo que para ser simulados con ondas de rampa con características de sobre voltaje, las cuales simulan la caída de un rayo o sobretensión en la línea.

Se recomienda trabajar con el aislador más detallado y obtener un programa más completo (versión profesional), donde además de la parte eléctrica también se pueda simular su comportamiento mecánico.

Trabajar con aisladores hechos de otros materiales y con otra clase de aisladores, pues lo planteado no solo se limita a los aisladores de suspensión aquí mostrados si no que también puede ser aplicado a otra clase de aisladores.

Trabajar algunas otras posibles configuraciones donde además de poder cambiar su forma física también se pueda en lo posible cambiar el material con el cual se fabrican los aisladores, ya que esta es otra variable que influye en el valor de capacitancia.

Trabajar un diseño más real de los aisladores donde se pueda incluir las diferentes situaciones a las que está expuesto un aislador en el campo, incluyendo su comportamiento ante eventuales fallas de alguna de las unidades dentro de una cadena de aisladores, pues en nuestros análisis se ha tomado el aislador ideal trabajando en un ambiente idóneo.

Hacer los análisis en una cadena de aisladores con más de dos unidades y con un valor de voltaje mayor, para comparar y observar los cambios hechos con respecto al diseño y valores aquí mostrados.

Apéndice A

Los elementos finitos

A.1 INTRODUCCION

El cálculo de ciertas estructuras se complica si su forma geométrica y/o cargas adoptan formas irregulares en cuyo caso es de aplicación el método de los elementos finitos consistente en sustituir la estructura por un modelo matemático de un cierto número de elementos independientes, denominados elementos finitos o discretos, unidos entre sí a través de un número finito de puntos o nodos.

A.2 Cómo se crea un modelo de elementos finitos

A cada elemento finito estudiado aisladamente se le aplica la teoría clásica de cálculo, lo que es posible dada la forma sencilla elegida (triángulos, rectángulos, etc.) estableciéndose las condiciones de contorno y equilibrio a través de los nodos. Esta discretización de la estructura permite su resolución planteando un sistema de ecuaciones lineales y se aplica fácilmente a cualquier estructura por complicadas que sean sus características geométricas y condiciones de carga. Para llevar a cabo esto, se necesitan un gran número de operaciones matemáticas, que debido a la naturaleza repetitiva se adaptan con total normalidad a la programación numérica y a su resolución con ordenador.

Fundamentalmente, la aplicación del método consiste en plantear para cada elemento finito la matriz de rigidez que relaciona las fuerzas con las deformaciones. A continuación se procede al ensamblaje de la matriz de rigidez total para toda la estructura.

Los elementos finitos se enlazan entre ellos solamente mediante los nodos, lo que significa que las condiciones de contorno de la estructura no se satisfacen a lo largo de los lados.

En general, dado que el método de cálculo mediante elementos finitos es un procedimiento aproximado, la precisión requerida aumenta directamente con el número de elementos empleados.

No es posible concretar el número de elementos que se requieren para obtener en cada caso la solución más satisfactoria, ya que va a depender de la estructura del objeto bajo estudio. La elección de la subdivisión más conveniente ha de realizarse de acuerdo con la experiencia, basándose, si es posible, en resultados obtenidos mediante ensayos. En cualquier caso, se deben poner en práctica soluciones que hagan intervenir mallas de diferentes dimensiones con el fin de asegurar la convergencia de los resultados.

A.3 Etapas para el cálculo con ordenador

Se distinguen tres bloques bien diferenciados que componen el proceso de cálculo de estructuras mediante el empleo de elementos finitos. A saber:

Preprocesador: El objetivo principal de esta etapa es conseguir la estructura mallada mediante nodos y elementos. Estos, son los puntos de control de la estructura mallada a través de los cuales se introducen datos y se obtienen resultados.

Solver: Parte interna del proceso. Resolución de sistemas de ecuaciones a partir de los datos introducidos.

Postprocesador: Análisis de resultados.

En la figura A.1 se muestran estas etapas

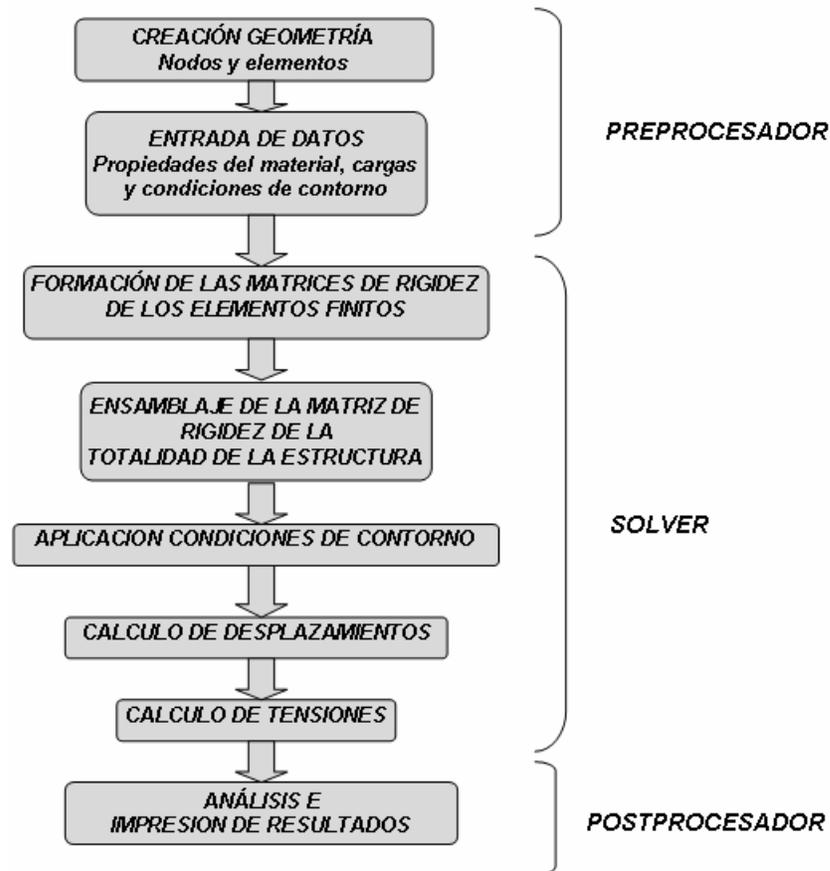


Figura A.1 Esquema Proceso de Cálculo mediante ordenador

A.4 Creación de geometría y entrada de datos:

En la entrada de datos se define la geometría de la estructura, las propiedades del material, las cargas que ha de soportar y los apoyos que la sustentan. A modo de ejemplo se detalla a continuación la que pudiera ser una secuencia idónea de introducción de datos a la hora de crear un modelo de elementos finitos.

- 1 – Crear o importar geometría,
- 2 – Especificar material y propiedades de cada elemento que componen el modelo,
- 3 – Mallado de la geometría mediante elementos y nodos.
- 4 – Aplicar condiciones de contorno o restricciones de movimientos en los nodos según correspondan,
- 5 – Introducir sistemas de cargas equivalentes que simulen la puesta en servicio de la estructura.

A.5 Obtención de la matriz de rigidez en cada elemento

En esencia el método de los elementos finitos se resuelve cuando en cada elemento se plantea la ecuación que liga las deformaciones de los nodos con las fuerzas en ella aplicadas a través de la matriz de rigidez. Finalmente se relacionan fuerzas en nodos y recorridos de estos, con lo que se define la matriz de rigidez.

A.6 Obtención de la matriz de rigidez global

Tras la obtención de las matrices de rigidez de todos los elementos se procede a su ensamblaje a fin de calcular la matriz de rigidez de la totalidad de la estructura.

A.7 Obtención de los desplazamientos

Consiste en la resolución de la ecuación empleándose para ello como procedimiento mas adecuado el método de eliminación de Gauss. Esta es la fase que ocupa la mayor parte del tiempo de cálculo.

A.8 Obtención de tensiones

A partir de la deducción de los desplazamientos en los nodos se obtienen las tensiones o fuerzas de sección para cada elemento finito.

A.9 Análisis y presentación de resultados

Una vez resueltas todas las ecuaciones y calculadas todas las incógnitas, los resultados se presentan tanto en listados como de forma visual en pantalla empleando colores para señalar zonas críticas y puntos donde los esfuerzos son mayores.

Apéndice B

En este capítulo se muestra más en detalle la forma en que se dividen los aisladores y las correspondientes ubicaciones de cada nodo, también se muestra el valor hallado entre los nodos especificados, aunque al realizar los cálculos todos los nodos tienen un valor, esos valores no se mostraron debido a la cantidad de valores que se obtienen, de todos modos aquí no se pretende realizar un análisis solo se pretende mostrar la forma como se realiza en cálculo hecho manualmente, en el capítulo tres se ha analizado los correspondientes valores que adquieren los nodos con la respectiva variación de aisladores sobre la cadena.

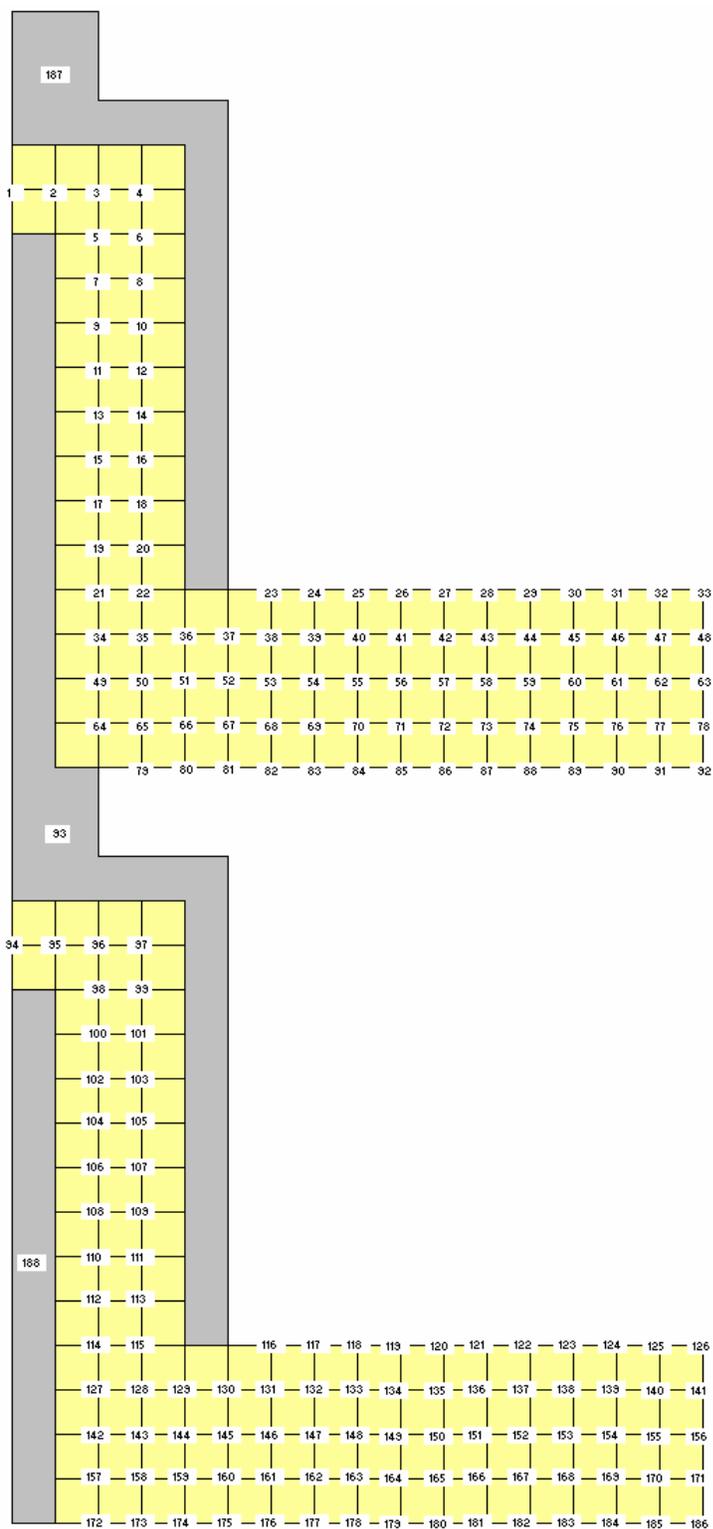


Figura B.1. Valor de voltaje hallado manualmente donde se realizo más divisiones en el arreglo de la cadena

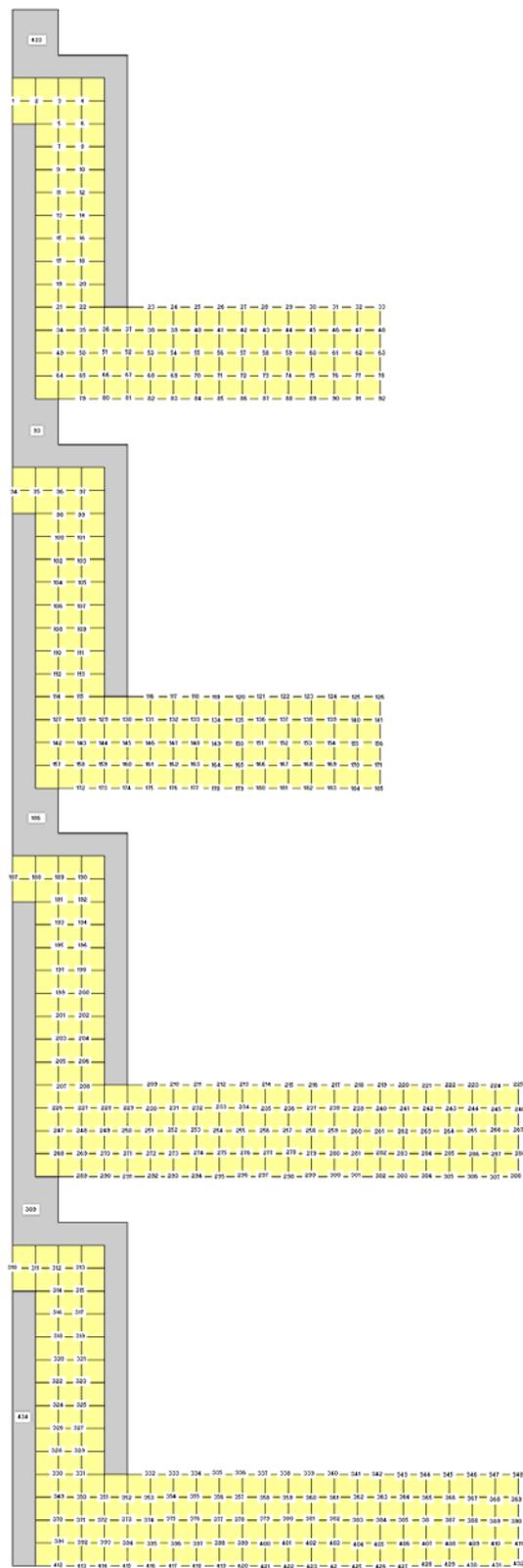


Figura B.2. Variación del largo de los dos primeros aisladores (de línea a ground)

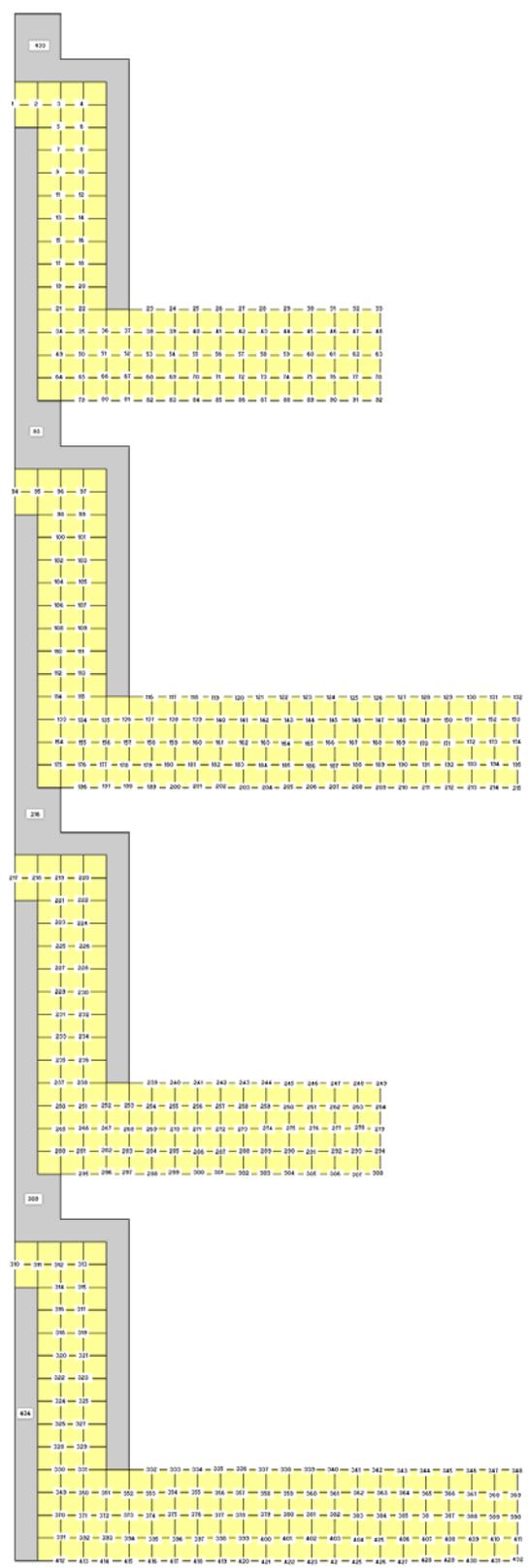


Figura B.3. Variación del largo del primer y tercer aislador (de línea a ground)

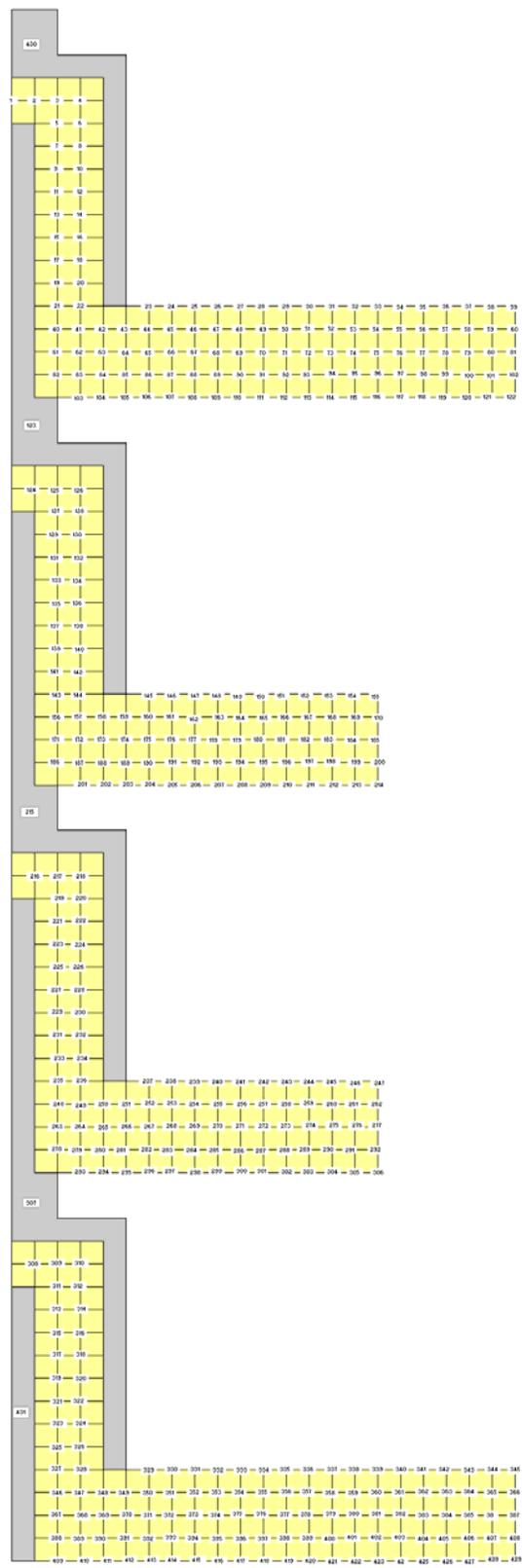


Figura B.4. Variación del largo del primer y cuarto aislador (de línea a ground)

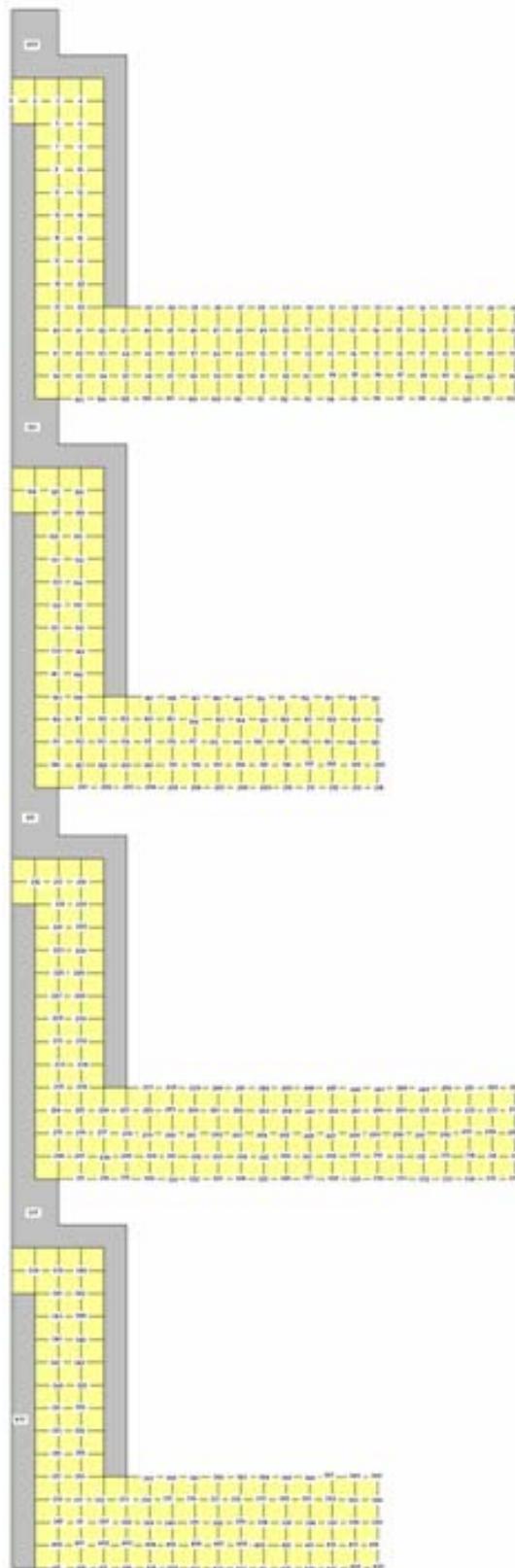


Figura B.5. Variación del largo del segundo y cuarto aislador (de línea a ground)

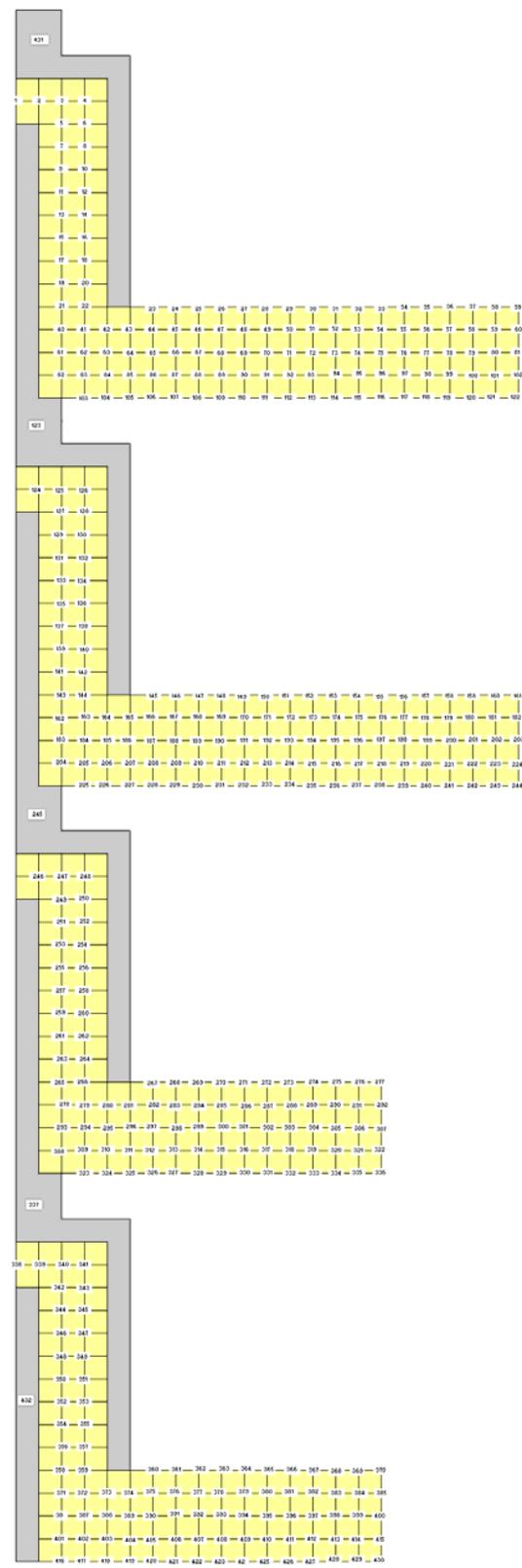


Figura B.6. Variación del largo del tercer y cuarto aislador (de línea a ground)

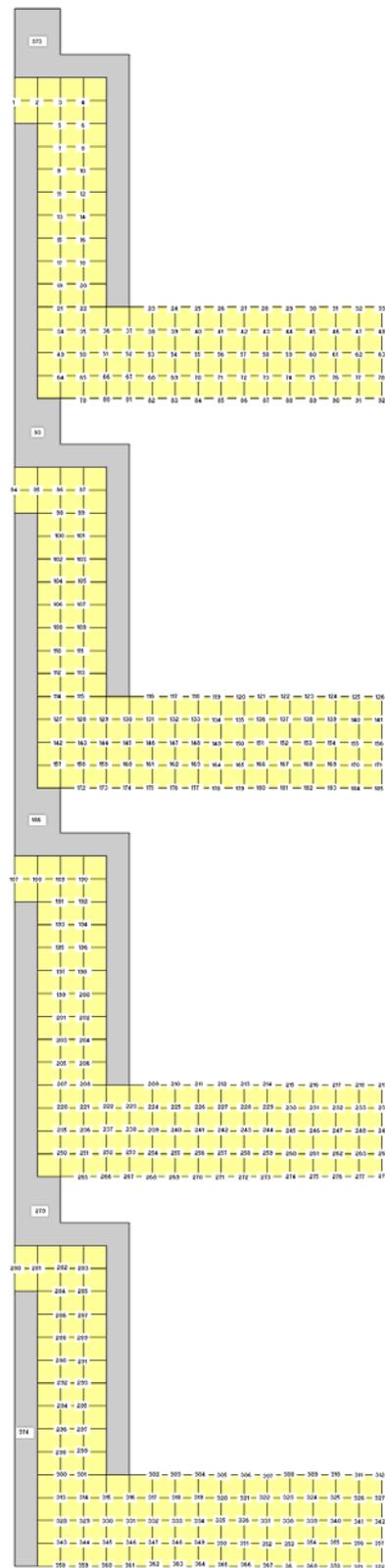


Figura B.7. Cadena de aisladores de cuatro unidades sin ninguna variación

Referencias

- [1] MARVIN, RH (1916) "A new method of grading suspension insulators", 33d annual convention of American Institute of Electrical Engineers, Cleveland, pag 745-755.
- [2] E.H.V. TRANSMISSION LINE REFERENCE BOOK. "Mechanism of contamination flashover", pag. 204-205, 266-281.
- [3] New Live Line Tester for Porcelain Suspension Insulators on High-Voltage Power Lines, Vaillancourt, G.H.; Bellerive, J.P.; St-Jean, M.; Jean, C.; Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume: 9 Issue: 1, Jan 1994 Page(s): 208 -219.
- [4] Instrument for Locating and Observing Defective Insulator Units, Bennett, C. E., United States Patent N^o. 1,542,815, June 23, 1925.
- [5] Prong Type Holder for Safety Testing Devices, Spangler, C. H., United States Patent N^o. 1,896,598, February 7, 1933.
- [6] The Characteristics and Performance in Services of High Voltage Porcelain Insulators, Forrest, J. S., IEE Journal, Vol. 89, Part II, N^o. 7, 1942, pp. 60-92.
- [7] Apparecchio per Individuare Gli Isolatori Guasti o Difettosi Montati su Linee Elettriche in Tensione, Castelli, C., Repubblica Italiana Brevetto por Invenzone 502453, November 30, 1954.
- [8] Method and Apparatus for Testing Insulators, Devine, C. W., United States Patent N^o 4, 266, 184, May 5, 1981.

[9] Apparatus for Detecting Defective Insulators in a Insulating Column Supporting an Electrical Conductor in a Power Circuit Line, Vaillancourt, G. H., Rizk, F., Brevet United States Patent N^o 4, 760, 343, Jul. 26 1988.

[10] Système de Détection des Éléments Défectueux dans les Chaînes D'Isolateurs sur les Lignes Haute Tension, Vaillancourt, G. H., Rizk, F., Brevet Canadian N^o. 1261001, Sep. 26, 1989.

[11] A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields, H. Singer, H. Steinbigler and P. Weiss, IEEE PAS, Vol. 93, pp. 1660-1668, 1974.

[12] Comparative Study of Three Methods for Computing Electric Fields, M. D. R. Basley, J. H. Pickles, G. d'Amino, L. Berretta, M. Fanelli, G. Giuseppetti, A. diMoraco, G. Gallet, J. P. Gregare, and M. Morin, Proc. IEE, Vol. 126, pp. 126-134, 1979.

[13] Field Behavior Near Singular Points in Composite Dielectric Arrangements, T. Takuma, T. Kouno and H. Matsuda, IEEE Elect. Ins., Vol 13, pp. 426-429, 1978.

[14] Field Optimization of High Voltage Insulators, M. Abdel-salam and E. K. Stanek, IEEE IAS, Vol. 22, pp. 594-601, 1986.

[15] Optimizing Field Stress on High Voltage Insulators, IEEE Elect. Ins., Vol. 22, pp. 47-56, 1987.

[16] Potential and Electric Field Distribution at High Voltage Insulator Shed, S. Kaana-Nkusi, P. H. Alexander and R. Hackman, IEEE Elect. Ins., Vol. 23, pp. 307-317, 1988.

- [17] Power Frequency and Impulse Field Calculation Around a High Voltage Insulator with Uniform and Non Uniform Surface Pollution, S. Chakravorti and P. K. Mukherjee, IEEE Elect. Ins., Vol. 28, pp. 43-53, 1993.
- [18] An Optimized Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields, IEEE PAS, pp. 2434-2438, 1978.
- [19] Electric Potential and Field Computation Along AC HV Insulators, El-Kishky, H.; Gorur, R.S.; Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Electrical Insulation, IEEE Transactions on], Volume: 1 Issue: 6, Dec 1994 Page(s): 982 -990.
- [20] Study on Electric Field Distribution and Flashover Mechanism of Polluted Suspension Insulator Sima Wenxia; Gu Leguan; Sun Caixin; Li Mingjia; Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000. Proceedings of the 6th International Conference on, Volume: 2, 2000 Page(s): 806 -808 vol.2.
- [21] A review of the Charge Simulation Method and its Applications, Malik, N.H.; Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on], Volume: 24 Issue: 1, Feb. 1989 Page(s): 3 - 20.
- [22] HERRN, C. EI WOLFGANG, J. (1980) "Untersuchung von verfahrenen zur Messung der Potential-Verteilung und Dämpfung von isolatorenkaetten", proyecto de grado Universidad de Karlsruhe R.F.A.

Bibliografía

[1] Calculation of Three-dimensional Axisymmetric Fields by Charge Simulation Method, M. Akazaki and Mishijima, Electrical Engineering in Japan, Vol. 98, pp. 1-7, 1978.

[2] Calculation of the Potential Distribution Around a Charge or a Current in the Presence of Three Dielectric Media Using the Image Method, M. Ianovici and J. J. Morf, IEEE Elect. Ins., Vol 12, pp. 165-170, 1977.

[3] Charge Simulation Modeling of Practical Insulator Geometry, M. J. Khan and P. H. Alexander, IEEE Elect. Ins., Vol. 17, pp. 325-332, 1982.

[4] Computation of Fields in and Around Insulators by Fictitious Point Charges, P. K. Mukherjee and C. Roy, IEEE Elect. Ins., Vol. 13, pp. 24-31, 1978.

[5] Charge Simulation with Complex Fictitious Charges for Calculating Capacitive-resistive Fields, IEEE PAS, Vol. 100, pp. 4665-4671, 1981.

[6]. Network Equivalents of Nodal and Edge Elements in Electromagnetics Demenko, A.; Sykulski, J.K.; Magnetics, IEEE Transactions on, Volume: 38 Issue: 2, Mar 2002 Page(s): 1305 -1308.

[7]. Application of Optimally Distorted Finite Elements for Field Calculation Problems of Electromagnetism Gyimothy, S.; Vagvolgyi, A.; Sebestyen, I.; Magnetics, IEEE Transactions on, Volume: 38 Issue: 2, Mar 2002 Page(s): 365 - 368.

[8]. Calculation of Electric Field and Potential Distribution Along Nonceramic Insulators Considering the Effects of Conductors and Transmission Towers

Zhao, T.; Comber, M.G.; Power Delivery, IEEE Transactions on , Volume: 15 Issue: 1 , Jan 2000 Page(s): 313 -318.

[9]. Irregular Vector Triangles and Tetrahedra for Finite-element Analysis in Electromagnetics McFee, S.; Donglin Ma; Magnetics, IEEE Transactions on, Volume: 38 Issue: 2, Mar 2002 Page(s): 353 -356.

[10]. Trefftz Finite Elements for Electromagnetics, Shlepnev, Y.O.; Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, Volume: 50 Issue: 5, May 2002 Page(s): 1328 -1339.

[11]. Gunshot Damage to Ceramic and Nonceramic insulators Burnham, J.T.; Waidelich, R.J.; Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume: 12 Issue: 4, Oct 1997 Page(s): 1651 -1656

[12]. Detection of Faulty Insulators on Power Transmission Line, Birlasekaran, S.; Li, H.J.; Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Volume: 4, 2000 Page(s): 2817 -2821 vol.4.

[13]. Internal Discharge Patterns in Faulty Insulators, Jiang Xiuchen; An Ling; Han Zhendong; Hou Yuanhong; Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000. Proceedings of the 6th International Conference on, Volume: 2, 2000 Page(s): 625 -628 vol.2.

[14]. Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of an Artificially Polluted Suspension Insulator, Suda, T.; Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Electrical Insulation, IEEE Transactions on] , Volume: 8 Issue: 4 , Aug 2001 Page(s): 705 -709.

[15]. Experience with the Detection of Faulty Composite Insulators on High-Voltage Power Lines by the Electric Field Measurement Method, Vaillancourt,

G.H.; Carignan, S.; Jean, C.; Power Delivery, IEEE Transactions on , Volume: 13 Issue: 2 , Apr 1998 Page(s): 661 -666.

[16]. An Investigation of DC Contamination Flashover Phenomena of Suspension Insulators Isaka, K.; Yokoi, Y.; Naito, K.; Matsuoka, R.; Ito, S.; Sakanishi, K.; Fuji, O.; Properties and Applications of Dielectric Materials, 1988. Proceedings. Second International Conference on Properties and Applications of , 12-16 Sep 1988 Page(s): 20 -24 vol.1.

[17]. A current Sensor for Insulator Corona Discharge Measurement, Huang Xingquan; Song Wei; Chen Yu; Yuan Yichao; ChengRong Li; Electrical Insulating Materials, 1998. Proceedings of 1998 International Symposium on, 27-30 Sep 1998 Page(s): 799 -802.

[18]. Study on the Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of Artificially Polluted 12t Suspension Insulators by the Clean Fog Method, Suda, T.; High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467), Volume: 4, 1999 Page(s): 115 -118 vol.4.

[19]. Study on the Shape of Suspension Insulators Influencing Development of Discharge, Wenxia Sima; Caixin Sun; Leguan Gu; Xinliang Jiang; Mingying Chen; Electrical Insulating Materials, 2001. (ISEIM 2001). Proceedings of 2001 International Symposium on, 19-22 Nov. 2001, Page(s): 290 -292.

[20]. Schaum's Outline of Theory and Problems of Finite Element Analysis, George R. Buchanan, Department of Civil Engineering Tennessee Technological University Cookeville, Tennessee, McGraw-Hill, 1994.

[21]. SOLANO R. y SUAZA V. (1986) "Determinación teórico experimental de la distribución de campo y potencial en una cadena de aisladores", Proyecto de grado Universidad Nacional.

[22]. SCHWAIGER, A. (1938) ELEKTRISCHE FESTIGKEITSLAHRE, Spring Verlag, Berlin, 2. Auflage.

[23]. MARVIN, RH (1916) "A new method of grading suspension insulators", 33d annual convention of American Institute of Electrical Engineers, Cleveland, pag 745-755.

[24]. BILLINGS, M.J. and STOREY, J.T. (1968) "Consideration of the effect of pollution of the potential distribution of insulator system". Proc IEEE. Vol 115, No 11, pags 1661-1666.

[25]. MULLER, C. (1967) "General digital computer program for the determination of 3dimensional electrostatic axially symmetric fields". Proc IEEE, Vol 114, No 10.

[26]. CARNAHAN, B., LUTHER, H.A. and WILKES, J.O. (1969) APPLIED NUMERICAL METHODS., U.S.A., WILEY.

[27]. CATALOGO TÉCNICO, ELECTROPORCELANA GAMMA S.A.

[28]. ESCUELA DEL TÉCNICO ELECTRICISTA (1960). Vol XII. Editorial Labor, Barcelona, pag 85-97.

[29]. ROMAN, F. (1982) "El método de los elementos finitos para el cálculo de campos electrostáticos". Ingeniería e investigación. U.N., vol 1, Nro. 4.

[30]. RYAN, H.M., MATTINGLEY, J.M. and SCOTT, M.F. (1971) "Computation of electric field distributions in high-voltage equipment". IEEE, Transactions on electrical insulator, vol EI-6, No 4, pag 148-154.

- [31]. SORENSON, R.W. (1932), THEORY OF DIELECTRICS. New York, Wiley.
- [32]. TRAIN, D. and DUBE, R. (1983), "Measurements of voltage distribution on suspension insulators for HVDC transmission lines" IEEE. Trans power App Sist. Vol pas 102, No 8, pag 2461-2475.
- [33]. VELANDIA, G. Y MIER-MAZA, R. "Cálculo iterativo de campos eléctricos en aisladores y otros equipos". Instituto de investigaciones eléctricas, división equipos, Cuernavaca Morelos.
- [34]. WARREN, L. y MIER-MAZA, R. (1981), "Diseño de aisladores para exteriores". Boletín IIE, pag 13-26.
- [35]. WURSTLIN, D. (1955), MESSUNGEN ÜBER DIE ENTLADUNGEN AN ARMATUREN VON HOCHPANNUNGS ISOLATORENKETTEN.
- [36]. THOMPSON, W.G.; "The mechanism of the contamination of porcelain insulators", J. IEEE, 1964, 91 pt II.
- [37]. BAATZ, H.; BOLL, G. New field experience with outdoor insulators in pollution areas and methods of assessing the performance of insulation under conditions of pollution, CIGRE, 1964, report 212.
- [38]. LAMBETH, P, J.; International Research of polluted insulators, CIGRE, 1970. paper 33-02.
- [39]. ELY, CH.; LAMBETH, P. J., "Artificial pollution test for high voltage outdoor insulators", IEE, Vol III, No. 5, May 1964.

[40]. WHITEHEAD, JOHN K. Hot line insulator washing. A.B. Chance, - IEEE Conference – Oct 1980.

[41]. CHERNEY, E.A. Standard contamination test method for high voltage insulators systems. CEA Contract report. No. 78-77. (Jul 1980); p. 27.

[42]. WILKINS, R. Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films. IEEE PROC. Vol. 116. No. 3(mar1969); p. 457-465.