



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA**

**MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**UNIDAD ZACATENCO**

“DETERMINACIÓN DE LA  $U_{50}$  AL IMPULSO POR FRENTE RÁPIDO PARA LA CONFIGURACIÓN PUNTA-PLANO A DISTANCIAS CORTAS”

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTAN:

**VALDEZ NÁJERA ALEJANDRO**

**VILCHIS SÁNCHEZ MARIO ANDRÉS**

ASESOR:



**ING. CESAR DAVID RAMÍREZ ORTÍZ**

**MÉXICO, D.F.**

**2015**

**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**  
**UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LOPEZ MATEOS"**

**TEMA DE TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
POR LA OPCION DE TITULACION  
DEBERA(N) DESARROLLAR

INGENIERO ELECTRICISTA  
TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL  
C. MARIO ANDRES VILCHIS SANCHEZ  
C. ALEJANDRO VALDEZ NÁJERA

**“DETERMINACIÓN DE LA  $U_{50}$  AL IMPULSO POR FRENTE RÁPIDO PARA LA  
CONFIGURACIÓN PUNTA- PLANO A DISTANCIAS CORTAS”**

PROPONER UN MODELADO MATEMÁTICO PARA CÁLCULAR LA TENSIÓN CRÍTICA DE FLAMEO ( $U_{50}$ ) QUE SE PRESENTA EN UN ARREGLO DE ELECTRODOS PUNTA- PLANO A DISTANCIAS CORTAS, ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LAS PUNTAS DE LOS ELECTRODOS UTILIZANDO UN PAQUETE COMPUTACIONAL

- ❖ INTRODUCCIÓN A LA TENSIÓN CRÍTICA DE FLAMEO
- ❖ AISLAMIENTO EN AIRE BAJO IMPULSO DE RAYO
- ❖ COMPORTAMIENTO DEL CAMPO ELÉCTRICO EN CONFIGURACIONES DE ELECTRODOS BAJO PRUEBAS EN ALTA TENSIÓN
- ❖ PRUEBAS DIELECTRICAS Y SIMULACIONES
- ❖ CONCLUSIONES

México D.F., A 11 de Marzo de 2015.

ASESOR

  
ING. CESAR DAVID RAMÍREZ ORTÍZ

  
ING. CESAR DAVID RAMÍREZ ORTÍZ  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE  
INGENIERÍA ELÉCTRICA.



# ÍNDICE.

<b>ÍNDICE.</b> ....	<b>II</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.</b> .....	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.</b> .....	<b>IV</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN A LA TENSIÓN CRÍTICA DE FLAMEO</b> .....	<b>5</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.2. ESTADO DEL ARTE.....	6
1.3. OBJETIVOS. ....	8
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	8
1.5. ESTRUCTURA DEL PROYECTO. ....	9
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES. ....	9
1.7. ANTECEDENTES.....	9
1.7.1 <i>Metodología de Gallet – Leroy.</i> ....	10
1.7.2 <i>Configuración punta-plano, ecuación de Pignini.</i> ....	10
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>12</b>
<b>AISLAMIENTOS EN AIRE BAJO IMPULSOS DE RAYO</b> .....	<b>12</b>
2.1. INTRODUCCIÓN.....	13
2.2. PRUEBAS EN LABORATORIOS DE ALTA TENSIÓN. ....	15
2.3. DESCARGA DISRUPTIVA Y TENSIÓN DE PRUEBA. ....	15
2.4. GENERADOR DE IMPULSOS DE MARX.....	15
2.4.1 <i>Circuito del generador de impulsos de varios escalones.</i> ....	16
2.5. FORMA DE ONDA ESTÁNDAR DEL IMPULSO POR RAYO.....	20
2.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS AISLAMIENTOS ELÉCTRICOS.....	21
2.7. RIGIDEZ DIELECTRICA. ....	22
2.8. PREÁMBULO DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO. ....	23
2.9. NIVEL BÁSICO DE AISLAMIENTO AL IMPULSO (NBAI). ....	23
2.10. DISTANCIAS DIELECTRICAS EN AIRE. ....	25
2.11. CONDICIONES ATMOSFÉRICAS. ....	26
2.12. EFECTOS EN LA DENSIDAD DEL AIRE. ....	27
2.13. EL MÉTODO “UP AND DOWN”. ....	27
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>29</b>
<b>COMPORTAMIENTO DEL CAMPO ELÉCTRICO EN CONFIGURACIONES DE ELECTRODOS BAJO PRUEBAS EN ALTA TENSIÓN.</b> .....	<b>29</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	30
3.2. MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN SISTEMAS AISLANTES. ....	30
3.3. UNIFORMIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO. ....	31
3.3.1 <i>Campo eléctrico en configuraciones sencillas.</i> .....	33
a) <i>Campo eléctrico uniforme.</i> ....	33
b) <i>Influencia de la configuración en el campo eléctrico.</i> ....	34
<i>Campos homogéneos.</i> ....	34

<i>Campos no homogéneos. Efecto corona.</i> .....	34
<i>c) Influencia de la forma de onda de tensión en la tensión disruptiva.</i> .....	35
3.4. INFLUENCIA DE LAS FORMAS DE ELECTRODOS EN TENSIONES DE DESCARGA PARA LOS ESPACIOS DE AIRE EN LAS PRUEBAS DE IMPULSO POR RAYO. ....	35
<i>a) Distancias en aire con y sin elementos aislantes entre electrodos.</i> .....	35
<i>b) Distancias en aire con elementos aislantes entre electrodos.</i> .....	37
3.5. RIGIDEZ DIELECTRICA BAJO SOBRETENSIONES DE FRENTE DE ONDA RÁPIDO EN REFERENCIA A CONDICIONES AMBIENTALES. ....	39
<i>Distancias de aire (sin aislamientos).</i> .....	39
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>43</b>
<b>PRUEBAS DIELECTRICAS Y SIMULACIONES</b> .....	<b>43</b>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	44
4.2. EQUIPO (DATOS DE PLACA).....	45
4.3. DESARROLLO.....	49
4.4. CORRECCIONES ATMOSFÉRICAS.....	52
4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	54
4.6. UTILIDAD DEL MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN UNA LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE 23 KV. ....	57
4.7. COMPORTAMIENTO DEL CAMPO ELÉCTRICO MÁXIMO PROMEDIO CON EL PAQUETE COMPUTACIONAL COMSOL. ....	58
4.8. CORRECCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO MÁXIMO PROMEDIO. ....	62
CONCLUSIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXO A. ....	67
<i>1. Procedimiento de simulación empleando el paquete computacional COMSOL.</i> .....	67
GLOSARIO. ....	79

## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 2.1</b> - Clasificación de los transitorios por rango de frecuencia. ....	14
<b>Tabla 2.2</b> - Valores de rigidez dieléctrica .....	22
<b>Tabla 2.3</b> - Tensiones y niveles de aislamiento normalizados de la categoría I <sup>(1)</sup> .....	24
<b>Tabla 2.4</b> - Tensiones y niveles de aislamiento normalizados de la categoría II <sup>(2)</sup> .....	25
<b>Tabla 4.1</b> - Valores de prueba en punta hemisférica [kV]. ....	50
<b>Tabla 4.2</b> - Promedio de $U_{50}$ en perfil hemisférico [kV]. ....	51
<b>Tabla 4.3</b> - Valores de prueba en punta cónica [kV]. ....	51
<b>Tabla 4.4</b> - Promedios de $U_{50}$ en perfil cónico [kV]. ....	51
<b>Tabla 4.5</b> - Corrección atmosférica a nivel estándar punta hemisférica [kV]. ....	53
<b>Tabla 4.6</b> - Corrección atmosférica a nivel estándar punta cónica [kV]. ....	53
<b>Tabla 4.7</b> - Distancias utilizando los modelos en referencia y el propuesto. ....	58
<b>Tabla 4.8</b> - Valores de campo eléctrico máximo promedio para la punta hemisférica. ....	60
<b>Tabla 4.9</b> - Valores de campo eléctrico máximo promedio para la punta cónica. ....	62
<b>Tabla 4.10</b> - Valores de campo eléctrico máximo promedio en la punta a nivel de la Ciudad de México. ....	62
<b>Tabla 4.11</b> - Factor de uniformidad del campo eléctrico $\eta$ .....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS.

<b>Figura 2.1</b> - Circuito del generador de impulsos de varios escalones .....	16
<b>Figura 2.2</b> - Diagrama equivalente del generador de impulsos .....	19
<b>Figura 2.3</b> - Onda normalizada de impulso por rayo .....	21
<b>Figura 2.4</b> - Secuencia con 9 disparos aplicados a un aislamiento bajo prueba .....	28
<b>Figura 3.1</b> - Configuración punta-plano .....	33
<b>Figura 3.2</b> - Campo eléctrico homogéneo .....	33
<b>Figura 3.3</b> - Descarga disruptiva en campo no homogéneo. ....	35
<b>Figura 3.4</b> - Resultados de impulso por rayo (1.2/50 $\mu$ s) en distancias de aire con y sin cadenas de aisladores entre electrodos .....	36
<b>Figura 3.5</b> - Tensión de ruptura al 50% de impulso por rayo para distancias de aire sin cadenas de aisladores como función del explosor para el factor $k$ .....	37
<b>Figura 3.6</b> - Tensión de ruptura al 50% de impulso por rayo para distancias de aire con cadenas de aisladores como función del explosor para el factor $k$ .....	38
<b>Figura 3.7</b> -Diagrama para evaluar la característica de descarga de distancia de aire en la base del explosor para el factor $k$ .....	38
<b>Figura 3.8</b> - Resultados de pruebas de impulso por rayo (1.2/50 $\mu$ s) en configuración punta plano sin aislamientos.....	40
<b>Figura 3.9</b> - Configuración punta-plano sin aislamientos en el explosor. Promedio de la $U_{50}$ bajo impulsos por rayo como una función de la distancia del explosor.....	41
<b>Figura 3.10</b> - Configuración sin aislamientos en el explosor.....	42
<b>Figura 4.1</b> - Generador de impulsos de Marx. ....	45
<b>Figura 4.2</b> - Datos de placa de los capacitores.....	46
<b>Figura 4.3</b> - Consola de mando.....	46
<b>Figura 4.4</b> - Control de tensión en C.A y rectificación.....	47
<b>Figura 4.5</b> - Datos de placa del control de tensión en C.A y rectificación.....	47
<b>Figura 4.6</b> - Punta cónica de latón. ....	48
<b>Figura 4.7</b> - Punta hemisférica de latón.....	48
<b>Figura 4.8</b> - Termómetros.....	49
<b>Figura 4.9</b> - Configuración electródica punta-plano. ....	50
<b>Figura 4.10</b> - Resultado de pruebas de impulso por rayo en configuración punta-plano. ....	52
<b>Figura 4.11</b> - Resultado de pruebas de impulso por rayo en configuración punta-plano corregidos a los niveles estándares. ....	54
<b>Figura 4.12</b> - Promedio de los valores estándares de ambos perfiles.....	55
<b>Figura 4.13</b> - Comparación entre los valores promedio y de las ecuaciones dadas en las referencias.....	56
<b>Figura 4.14</b> - Modelo propuesto.....	56
<b>Figura 4.15</b> - Concentración del campo eléctrico máximo promedio para una punta hemisférica a una distancia de 0.3 m del plano. ....	59
<b>Figura 4.16</b> - Gráfica del valor del campo eléctrico máximo promedio para una punta hemisférica del plano hacia la punta. ....	59
<b>Figura 4.17</b> - Concentración del campo eléctrico máximo promedio para una punta cónica a una distancia de 0.3 m del plano.....	61
<b>Figura 4.18</b> - Gráfica del valor del campo eléctrico máximo promedio para una punta cónica del plano hacia la punta. .	61
<b>Figura 4.19</b> - Factor de uniformidad del campo eléctrico para el perfil hemisférico y cónico. ....	64

# Capítulo I

Introducción a la tensión crítica de flameo.

## 1.1. Introducción.

La sociedad necesita un suministro de electricidad continuo, seguro, de calidad y respetuoso con el medio ambiente; la energía eléctrica es muy importante para el progreso y calidad de vida. Cuando el suministro de esta energía falla se prevé cierto caos en los hogares, en las escuelas, y en los centros de trabajo, si la falla en los sistemas de distribución se dilata o persiste las consecuencias van desde lo económico hasta lo social. [1]

Para evitar los problemas que causan estos incidentes, los sistemas eléctricos se diseñan para resistir tanto los fenómenos naturales como el viento, la lluvia, los rayos, etc., así como los propios de los sistemas eléctricos, como maniobras en sus equipos y/o cortocircuitos. [1]

El conocimiento del funcionamiento de las redes eléctricas, de las características de los materiales ante los distintos fenómenos e incidentes que se producen en ellas, permite adoptar medidas y dar soluciones que se aplican desde el diseño inicial, durante la operación y en el mantenimiento de las instalaciones. [1]

En este trabajo se llevan a cabo pruebas experimentales de aislamiento en aire a distancias cortas entre electrodos hasta 30 cm para la configuración punta-plano, con dos tipos de perfil (cónico y hemisférico), en el laboratorio de alta tensión de la ESIME Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional, al aplicar impulsos de rayo normalizados de polaridad positiva (frente rápido). A partir de dichos valores experimentales, se propone un modelo matemático para determinar la tensión crítica de flameo ( $U_{50}$ ) y, por medio de un paquete computacional, analizar el comportamiento del campo eléctrico bajo los perfiles de los electrodos.

A partir de este modelo, se contribuirá a tener una herramienta matemática para calcular la  $U_{50}$  para cualquier configuración fase-tierra con distancias del espacio en aire reducidas (hasta 30 cm) y proponiendo una ecuación para la coordinación de aislamiento para las redes de distribución de energía eléctrica (hasta 23 kV).

Seguidamente con un paquete computacional denominado COMSOL se analiza el comportamiento del campo eléctrico de los perfiles de las puntas cónico y hemisférico, se analiza el comportamiento que presenta la descarga y qué tanto es afectado este tipo de prueba por la forma de los perfiles.

## 1.2. Estado del arte.

La resistencia al arqueo en distancias de aire es diferente tanto para impulso de sobretensión por rayo como por maniobra de interruptores, lo que también depende de la forma y disposición física de los electrodos; además de las condiciones atmosféricas (presión y de temperatura).

Se han desarrollado líneas de investigación en laboratorios de alta tensión principalmente en Europa y Estados Unidos, llegando a establecer valores de distancia de fase a tierra para distintas configuraciones de electrodos que han permitido el dimensionamiento eléctrico en líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. [2]

La información estadística del comportamiento de las instalaciones bajo condiciones de operación diversas, junto con los resultados experimentales de laboratorio, han permitido establecer criterios de diseño y reglas semiempíricas que simplifican el cálculo del aislamiento en las instalaciones eléctricas. Es así como se ha llegado a determinar que en instalaciones eléctricas de 300 kV o mayores el efecto de sobretensiones es más severo por ondas debidas a maniobra de interruptores que por descargas atmosféricas. Por otra parte, se ha logrado establecer fórmulas semiempíricas que permiten determinar las tensiones críticas de flameo ( $U_{50}$ ) basándose en datos estadísticos. [2]

El empleo de altas tensiones como: 6.6, 13.2, 13.8, 15, 35 kV en generación y 85, 115, 230 y 400 kV en subtransmisión y transmisión hace necesario un mayor estudio de las técnicas de alta tensión y un mayor entendimiento de los materiales aislantes que intervienen en el diseño y construcción de los diferentes equipos eléctricos que conforman los sistemas eléctricos de potencia. [2]

En la actualidad la transmisión de potencia eléctrica tiende a aumentar los niveles de tensión, así que década a década aparecen niveles de tensión de transmisión más elevados. En la actualidad es posible encontrar niveles de 800 kV y experimentalmente se tienen líneas hasta de 1000 kV en C.A. [2]

Sin embargo, no se han realizado investigaciones referentes a distancias cortas para la coordinación de aislamiento en instalaciones eléctricas en los sistemas de distribución (menores a 23 kV), por lo que al coordinar un equipo en 23 kV se utilizan las mismas ecuaciones que se emplean en un equipo de 85 o 230 kV. [3]

Se han hecho pruebas para varias configuraciones, entre las cuales destaca la condición más crítica que es la configuración punta-plano con ambas polaridades, con y sin cadenas de aisladores, en condiciones secas y húmedas, que se describen en el Capítulo IV. Es importante tomar en cuenta los resultados de estas pruebas porque nos ayudarán al compararlos con nuestros resultados experimentales.

Para realizar este trabajo nos basamos en dos ecuaciones que se utilizan para el cálculo de la  $U_{50}$  en impulso por rayo, las cuales se determinan mediante las ecuaciones semiempíricas con referencias en polaridad positiva y en su forma estándar:



$$U_{50} = k 455 d \quad (1.1) \quad [2]$$

$$U_{50} = k 500 d \quad (1.2) \quad [4]$$

donde:

$U_{50}$  = Tensión crítica de flameo (kV)

$k$  = Factor de configuración electródica

455 = Valor del campo eléctrico cuando se inicia el streamer (kV/m)

500 = Valor del campo eléctrico cuando se inicia el streamer (kV/m)

$d$  = Distancia de fase a tierra en aire (m)

En el segundo objetivo se analiza el comportamiento del campo eléctrico en los perfiles de los electrodos con los que se trabaja en la parte experimental de este trabajo; esto se describe en el Capítulo IV. Para ello se utiliza un paquete computacional denominado COMSOL Multiphysics, que es un software de análisis y resolución por el método de elementos finitos para múltiples aplicaciones de física y de ingeniería. Este software cuenta con varios módulos, para este caso se utiliza el módulo AC/DC con el cual se pueden realizar simulaciones de componentes eléctricos.

### 1.3. Objetivos.

- Proponer un modelo matemático para calcular la tensión crítica de flameo ( $U_{50}$ ) que se presenta en un arreglo de electrodos punta-plano a distancias cortas, (hasta 30 cm) aplicando impulsos de rayo de polaridad positiva con una forma de onda normalizada 1.2/50  $\mu$ s, considerando las condiciones atmosféricas de la Ciudad de México y el tipo de perfil de los electrodos.
- Analizar el comportamiento del campo eléctrico en las puntas de los electrodos utilizando un paquete computacional.

### 1.4. Justificación.

La información al respecto de este tema es escasa. Existe una mayor cantidad de información referente a la determinación de la  $U_{50}$  para configuraciones fase-tierra al aplicar impulsos de maniobra de interruptores que por impulsos por descargas atmosféricas.

Las pocas investigaciones realizadas en este tema se enfocan en configuraciones fase-tierra a distancias grandes (superiores a 1 m), por lo que las ecuaciones que se tienen para calcular dicha tensión son obtenidas a partir de configuraciones reales y a condiciones atmosféricas distintas a las de la Ciudad de México. Al aplicar las ecuaciones 1.1 y 1.2 para una configuración punta-plano para una distancia menor de 1 m, se tiene un alto grado de error, debido a que las

ecuaciones ya mencionadas tienen un comportamiento lineal, sin embargo a distancias cortas no sucede lo mismo ya que obtenemos un comportamiento diferente, como se puede ver más adelante, en la Figura 4.14.

Para reafirmar lo anterior, se hizo un estudio del comportamiento del campo eléctrico promedio máximo en las puntas por medio de un paquete computacional con los valores obtenidos experimentalmente.

Lo anterior nos da la pauta para la realización de este trabajo, con la finalidad de hacer una contribución en el tema en cuanto a la propuesta de un nuevo modelo matemático para calcular la  $U_{50}$  a distancias cortas (menores de 30 cm) y así contribuir en la coordinación de aislamiento para instalaciones eléctricas en los sistemas de distribución (hasta 23 kV).

### **1.5. Estructura del proyecto.**

Este trabajo tiene un perfil de investigación bibliográfica, se cuenta con pruebas de laboratorio, simulaciones en computadora y su contenido está seccionado en 4 Capítulos que se describen brevemente a continuación.

En el Capítulo I se plantean los objetivos, así como una mención de trabajos previos que se han realizado sobre el tema y que se emplean como referencia.

El Capítulo II trata sobre el concepto de descarga disruptiva, el diagrama equivalente del generador de impulsos de Marx de varias etapas y el cálculo de la  $U_{50}$ .

El Capítulo III aborda el tema del comportamiento del campo eléctrico en configuraciones de electrodos bajo pruebas en alta tensión, con la finalidad de proyectar un sistema aislante.

Capítulo IV aquí se describen los materiales, equipos y el procedimiento de las pruebas experimentales en el laboratorio de altas tensiones en la ESIME Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional.

### **1.6. Alcances y limitaciones.**

Los alcances del proyecto están en función de las limitaciones, que en este caso son la parte experimental del trabajo, por la potencia del equipo y su antigüedad.

### **1.7. Antecedentes.**

Diversos estudios han sido realizados en diversos lugares, principalmente Europa y Estados Unidos y se ha llegado a resultados experimentales que se aplican al diseño. Estos resultados difieren en algunos casos por ser desarrollados con

diferentes técnicas, objetivos y grados de precisión. Entre los más significativos se pueden mencionar los desarrollados por L. Paris y Taschini en Italia y Gallet y Leroy en Francia. [2]

### 1.7.1 Metodología de Gallet – Leroy.

Gallet y Leroy, de Electricité de France (EDF), desarrollaron investigaciones paralelas a L. París, pero dirigidas a dimensionamiento de laboratorios de alta tensión; llegaron a expresiones semiempíricas que relacionan la tensión crítica de flameo ( $U_{50}\%$ ) con la distancia de fase a tierra para las mismas configuraciones de electrodos usados por L Paris. [2]

Experimentalmente también se llegó a determinar una expresión que permite calcular la tensión crítica de flameo por impulso de rayo. Gallet y Leroy encontraron que la relación entre la distancia y la tensión crítica de flameo por impulso de rayo para una onda normalizada de 1.2/50  $\mu$ s es:

$$U_{50}\% = k 455 d \quad (1.1)$$

donde:

$U_{50}\%$  = Tensión crítica de flameo por impulso de rayo (kV)

$k$  = Factor de configuración eléctrica

455 = Valor del campo eléctrico cuando se inicia el streamer (kV/m)

$d$  = Distancia crítica de flameo de fase a tierra (m) [2]

### 1.7.2 Configuración punta-plano, ecuación de Pignini.

Se puede aplicar la configuración punta-plano como un equipo de protección auxiliar, junto con los apartarrayos, para proporcionar seguridad adicional al aislamiento de los principales equipos de una subestación, como los transformadores, reactores e interruptores así como sus boquillas. La configuración punta-plano normalmente se utiliza en paralelo, y esto tienen un retraso de tiempo de flameo que van desde 2 hasta 10  $\mu$ s dependiendo de la distancia entre los electrodos para que el equipo protegido sea capaz de soportar la tensión de ionización de los gaps en este tiempo.

La ecuación para calcular la tensión de flameo al 50% de la configuración punta-plano ( $U_{50}$ ), es la siguiente:

$$U_{50} = k 500 d \quad (1.2)$$

donde:

$U_{50}$  = Tensión crítica de flameo por impulso de rayo (kV)

$k$  = Factor de configuración electródica

500 = Valor del campo eléctrico cuando se inicia el streamer (kV/m)

$d$  = Distancia crítica de flameo de fase a tierra (m) [4]

#### Especificación CFE L 0000-06

Las distancias en aire de fase a tierra y de fase a fase deben garantizar estadísticamente una probabilidad de flameo tal que resulte baja desde el punto de vista de los criterios de diseño adoptados. Esto conduce al establecimiento de distancias mínimas de no flameo entre fase y tierra o entre fases y que se determina principalmente para los impulsos por rayo.

La norma de CFE L 0000-06 para la determinación de las distancias dieléctricas considera la siguiente ecuación :

$$U_{50} = 480 d \quad (1.3)$$

donde:

$U_{50}$  = Tensión crítica de flameo (kV)

480 = Factor de electrodos para una configuración punta-plano (kV/m)

$d$  = distancia entre electrodos (m) [3]

# Capítulo II

Aislamientos en aire bajo impulsos de rayo.

## 2.1. Introducción.

Los equipos que conforman las instalaciones eléctricas pueden ser dañados por sobretensiones; las sobretensiones son una falla en un sistema eléctrico con un valor mayor al valor de cresta de la tensión eléctrica nominal del sistema en turno. Las sobretensiones se originan por cortos circuitos, por maniobra de interruptores o por descargas atmosféricas. Es importante comprender dichos fenómenos por cuestiones de seguridad, de aquí la importancia de tener en cuenta el comportamiento del aislamiento. [1]

El estudio de las sobretensiones radica en que permite diseñar las redes del sistema eléctrico, el conocimiento de las sobretensiones sirve para determinar el nivel de aislamiento, se debe entender el origen y sus características; otro aspecto importante es precisar su distribución estadística. [1]

Primero hay que saber que la causa de una sobretensión puede ser interna o externa al sistema eléctrico. Las sobretensiones de origen externo suceden principalmente por el golpe de un rayo, las sobretensiones de origen interno suceden al interior del propio sistema y son por maniobra. [1]

Las sobretensiones temporales o transitorias tienen relación con la maniobra de interruptores en una red eléctrica, pueden ser de gran amplitud y con una forma de onda indeterminada. Las mayores sobretensiones pueden deberse a: [1]

- Cortos circuitos
- Desconexión de transformadores y reactores en vacío
- Interrupción de líneas largas de transmisión en vacío

Precisar los tipos de sobretensiones considerando las diversas condiciones de las redes eléctricas se realiza mediante simulaciones analógicas o digitales (en tableros que analizan transitorios o computadoras respectivamente) y se expresan en por unidad referidas al mayor valor de tensión eléctrica de operación del sistema a tierra, estos valores se pueden encontrar en la norma IEC-71 de coordinación de aislamiento. [1]

**Tabla 2.1** - Clasificación de los transitorios por rango de frecuencia. [1]

Grupo	Rango de frecuencia	Características del fenómeno	Tipo de transitorio
I	0,1 Hz – 3 KHz	Oscilación de baja frecuencia	Temporales: Energización de transformadores, ferro resonancia, rechazo de carga, corto circuito 1 $\phi$ .
II	50/60 Hz – 20 KHz	Frente de onda lento	Maniobra, energización de línea, Inicio y liberación de fallas, recierre de línea.
III	10 KHz – 3MHz	Frente de onda rápido	Descargas atmosféricas, fallas en subestaciones.
IV	100 KHz – 50MHz	Frente de onda muy rápido	Maniobras y fallas en subestaciones aisladas en gas.

Las sobretensiones exigen a los aislamientos tanto internos como externos a esfuerzos dieléctricos que pueden dañarlos y derivar en condiciones inseguras. Para diseñar instalaciones eléctricas se necesita prever las características y comportamientos de equipos y aparatos, así como las distancias dieléctricas; por lo que se requiere reproducir de alguna forma los efectos de las sobretensiones para hacer el estudio pertinente de su comportamiento bajo esas condiciones. [5]

Por lo anterior, es que se realizan pruebas conforme a normas, que se han ido desarrollando a la par de los equipos eléctricos y de las instalaciones eléctricas. Es importante mencionar que estas pruebas no reproducen con exactitud las condiciones normales de operación, pero permiten obtener resultados aproximados, que son la base para determinar el comportamiento de los equipos e instalaciones. [5]

Para simular los esfuerzos de sobretensión monofásicas (fase a tierra) se usan los denominados generadores de impulso con los que se desarrollan las técnicas de prueba recomendadas en las diferentes normas nacionales e internacionales. Estos generadores operan de acuerdo con el circuito original desarrollado por Marx en 1923, y en el que un cierto número de capacitores se carga en paralelo y entonces súbitamente se conectan en serie por medio de explosores en forma de esferas. [6]

## **2.2. Pruebas en laboratorios de alta tensión.**

El objetivo de practicar pruebas en los equipos eléctricos es verificar que se encuentran en buen estado, y así garantizar su correcto funcionamiento. Las pruebas que se practican a los equipos eléctricos son específicas para cada uno de ellos; las normas son elaboradas por instituciones especializadas, en colaboración con fabricantes y clientes, estableciendo las características y métodos de prueba. [5].

## **2.3. Descarga disruptiva y tensión de prueba.**

Una descarga disruptiva es el paso de un arco eléctrico como consecuencia de la rotura del nivel de aislamiento (ruptura dieléctrica) de un dieléctrico debido a una sollicitación eléctrica. La descarga cortocircuita por completo el aislamiento disminuyendo a un valor mínimo el valor de la tensión eléctrica aplicada. Existen otros términos como “flameo” (flashover) que se utiliza para nombrar una descarga disruptiva que se produce en un medio gaseoso; “perforación” (puncture) se emplea para llamar a una descarga disruptiva que se presenta a través de un dieléctrico sólido. [5]

Cuando se origina una descarga disruptiva en un dieléctrico sólido pierde su característica dieléctrica permanente, mientras que en un dieléctrico líquido o gaseoso la pérdida de su característica dieléctrica puede ser solamente temporal. También pueden producirse descargas no disruptivas entre electrodos o conductores que se designan como “descargas parciales” que son tratadas por la publicación IEC 270: “Partial Discharge Measurements”. [5].

## **2.4. Generador de impulsos de Marx.**

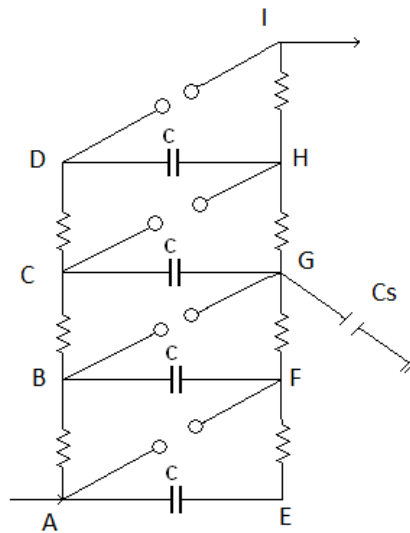
En 1923 Marx patentó un método para producir altas tensiones mediante la carga de capacitores en paralelo y su descarga en serie, anteriormente a este año se usaba la bobina de Tesla. El circuito de Marx permite la generación de ondas de impulso de alta tensión con bastante aproximación y controlables en magnitud y forma. Actualmente los generadores de impulso que se usan en laboratorios de



alta tensión están contruidos conforme el circuito de Marx o con circuitos derivados de éste. [6].

### 2.4.1. Circuito del generador de impulsos de varios escalones.

Los generadores de impulso de un solo escalón resultan insuficientes, debido a la dificultad y alto costo que representa producir tensiones de corriente directa para carga a altos valores de tensión. Por esta dificultad el arreglo de Marx sugiere el arreglo de elementos en el que un conjunto de capacitores se cargan en paralelo a través de resistencias de alto valor y se descargan en serie por medio de explosores al presentarse el arqueo entre éstos. [6]



**Figura 2.1** - Circuito del generador de impulsos de varios escalones. [6]

En la Figura 2.1:

$C$  = Capacitores

$C_s$  = Capacitancia de dispersión

Los capacitores  $C$  de cada escalón se cargan en paralelo a través de las resistencias de carga  $R$ , de manera que al final del periodo de carga los puntos indicados en el circuito con  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  estarán a la misma tensión que la fuente de corriente directa, por ejemplo una tensión  $V$ , mientras que los puntos,  $E$ ,  $F$ ,  $G$  y  $H$ , estarán al potencial de tierra. La descarga del generador se produce provocando la ruptura dieléctrica entre los gaps localizados entre  $A$ - $F$ ,  $B$ - $G$ ,  $C$ - $H$ ,  $D$ - $I$ . Al ocurrir esto, el punto  $F$  se carga de  $0$  a  $V$  ( $V$  representa la tensión de la fuente de corriente directa) y si no existen pérdidas de carga el punto  $B$  estará a 2 veces la tensión  $V$  mientras que el punto  $G$  permanecerá al potencial de tierra

debido a la capacitancia de dispersión ( $C_s$ ). Esto produce que el explosor entre los puntos B y G se eleve de tensión y se tenga la ruptura. Inmediatamente se tiene una tensión 2V y G-C se eleva a 3V. El proceso se repite de tal forma que la salida del generador en el punto I es nI. [6]

donde:

$n$  = número de escalones.

Con la siguiente expresión se pueden sacar los valores de las resistencias de frente y de cola y así tener los tiempos de frente  $T_f$  y de cola  $T_c$  en pruebas de impulso de rayo. [6]

#### **Tiempo de cola.**

$$T_c = 0.693 C R_2 \quad (2.1)$$

donde:

$C$  = Capacitancia por escalón en el generador

$R_2$  = Resistencias de cola en el generador

#### **Tiempo de frente.**

$$T_f = \frac{3CC_2R_1}{C + C_2} \quad (2.2)$$

donde:

$C$  = Capacitancia por escalón en el generador

$C_2$  = Capacitancia del objeto bajo prueba más la capacitancia básica (Divisor)

$R_1$  = Resistencias de frente en el generador

A continuación se mencionan algunas consideraciones prácticas que se deben tener en cuenta durante la realización de pruebas de alta tensión con los generadores de impulso. [6]

- La energía de salida de un generador varía conforme sea el propósito de la prueba, por ejemplo para la prueba de un cable de potencia la energía será mayor que en la prueba de una cadena de aisladores, la energía de salida del generador de impulsos debe ser cuando menos de 5 veces la capacitancia del objeto de prueba, se puede calcular con la siguiente expresión: [6]

$$E = \frac{1}{2} C_g V^2 \quad (2.3)$$

donde:

$C_g$  = Capacitancia del generador (nf)

$V$  = Tensión de prueba (kV)

En los generadores de impulso modernos  $C_g$  varía entre 20 y 30 nf, así para un generador con una capacitancia de 20 nf la energía en k - Joules es:

$$E = \frac{1}{2} 20V^2 = 10V^2 \text{ k Joules} \quad (2.4)$$

- La eficiencia de los generadores de impulso modernos en pruebas de impulso por rayo es del orden de 90% y 75% en las pruebas de impulso por maniobra de interruptores. [6]
- El control de los tiempos de frente y de cola de la pruebas de impulsos por rayo se logra, con las resistencias de frente y las resistencias de cola que pueden ser conectadas en serie o paralelo, de manera que si el generador tiene  $n$  escalones para ondas de 1.2/50  $\mu s$  los valores característicos del diagrama equivalente se calculan como sigue para  $S$  escalones en serie y  $P$  escalones en paralelo. [6]

### Capacitancia de impulso.

$$C_s = \frac{P \cdot C \text{ por escalón}}{S} \quad (2.5)$$

donde:

$P$  = Escalones en paralelo

$C$  = Capacitancia

$S$  = Escalones en serie

### Resistencia de cola.

$$R_2 = \frac{S \cdot R_2 \text{ por escalón}}{P} \quad (2.6)$$

donde:

$S$  = Escalones en serie

$R_2$  = Resistencia para el control de la cola de la onda

$P$  = Escalones en paralelo

### Resistencia de frente.

$$R_1 = \frac{S}{P} (R_1 \text{ por escalón} + R_{1e}) \quad (2.7)$$

donde:

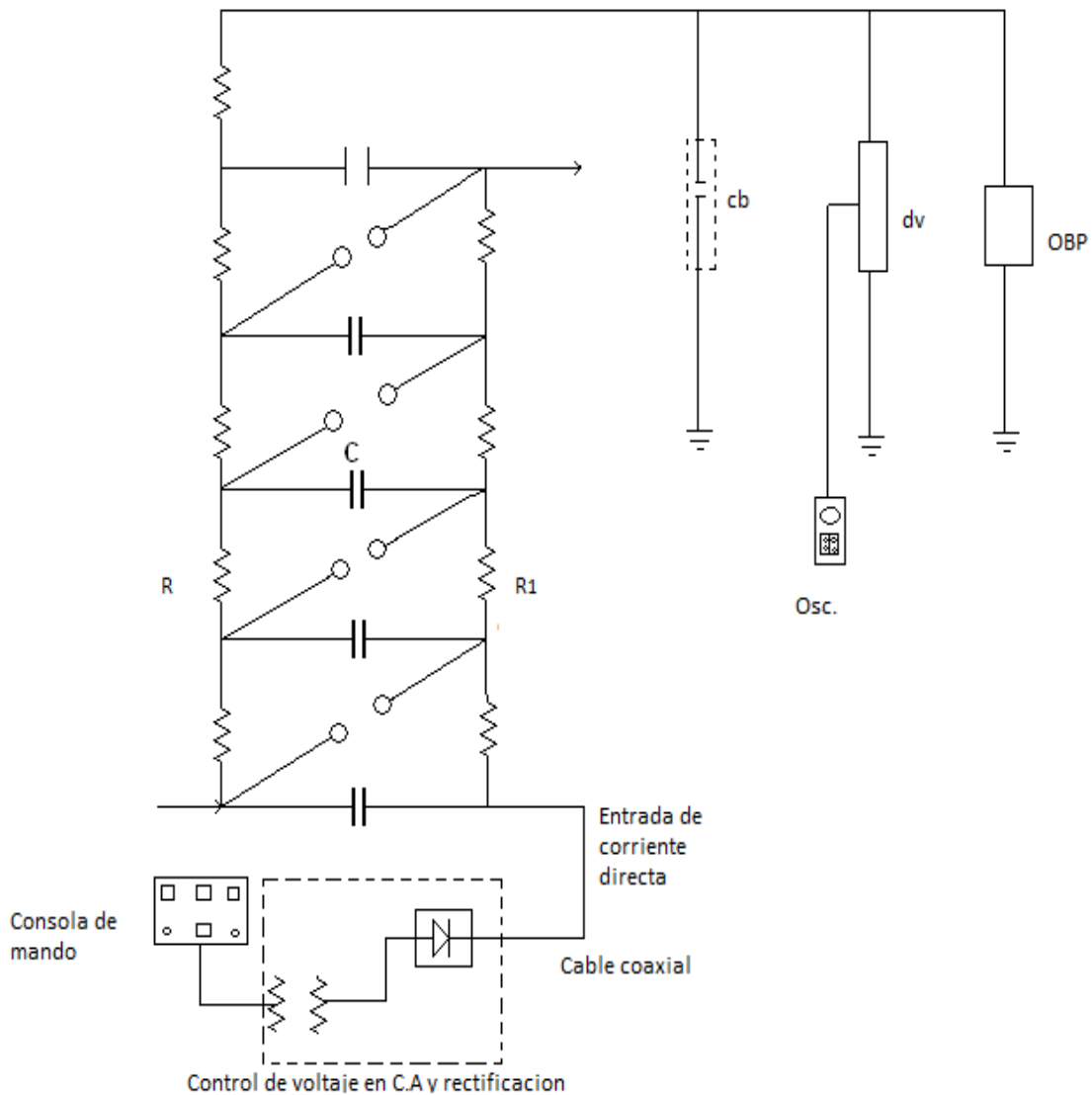
$S$  = Escalones en serie

$P$  = Escalones en paralelo

$R_1$  = Resistencias de frente en el generador

$R_{1e}$  = Resistencia externa de frente de onda

El diagrama para el generador de impulsos es el que se indica a continuación.



**Figura 2.2** - Diagrama equivalente del generador de impulsos. [6]

En la Figura 2.2:

$cb$  = Capacitancia básica o de acoplamiento

$dv$  = Divisor de tensión

$OBP$  = Objeto bajo prueba

$Osc$  = Osciloscopio

La capacitancia básica o de acoplamiento  $cb$  tiene como propósito principal filtrar la forma de onda del generador al objeto bajo prueba  $OBP$ .

El propósito básico del divisor de tensión  $dv$  es reducir el valor de la tensión aplicada del objeto bajo prueba  $OBP$  a un valor tal que es registrado por el

osciloscopio *OSC* sin que éste sea dañado. Se construyen del tipo resistivo, capacitivo o resistivo-capacitivo.

El osciloscopio *OSC* es el elemento que registra los impulsos aplicados al objeto durante la prueba, se conecta a la red de alimentación de *C.A.* de la instalación y la señal reducida del impulso se manda por medio de un cable coaxial, en donde se registra por medio de una cámara fotográfica con el obturador abierto con el fin de poder registrar el transitorio.

La consola de mando está construida por un gabinete en donde se tiene el control de energización del generador de impulsos, el sistema de disparo del generador que por lo general es automático aunque pueden existir aun manuales, instrumentos que indican la tensión de carga, la tensión aplicada, la separación de explosores y las conexiones necesarias a otros dispositivos de medición. [6]

### **2.5. Forma de onda estándar del impulso por rayo.**

Las formas de onda de sobretensiones por descarga atmosférica, (rayo) son altamente variables. En las pruebas que se aplican las ondas deben ser normalizadas. Este tipo de onda tiene una duración de unos cuantos  $\mu\text{s}$  hasta décimas de  $\mu\text{s}$ .

#### **Definición de la tensión estándar de prueba.**

La forma de onda para probar equipo eléctrico está dada en las normas o recomendaciones para pruebas de alta tensión, por ejemplo en la norma de la Comisión Internacional de Electrotecnia IEC-60. [6]

Para simular la descarga por rayo se emplea la onda de impulso por rayo que tiene un tiempo de frente de  $1.2 \mu\text{s}$  y un tiempo de cola de  $50 \mu\text{s}$  denominándose onda estándar de  $1.2/50 \mu\text{s}$ . El tiempo de cola es aquel al cual la onda adquiere el 50% de su valor. Al respecto las normas recomiendan los siguientes valores: [6]

#### **Onda de impulso por rayo.**

Tiempo de frente  $T_f = 1.2 \pm 0.36 \mu\text{s}$

Tiempo de cola (al 50% de su valor)  $T_c = 50 \pm 10 \mu\text{s}$

Oscilación: menor del 5% en la región cercana al valor cresta. [6]

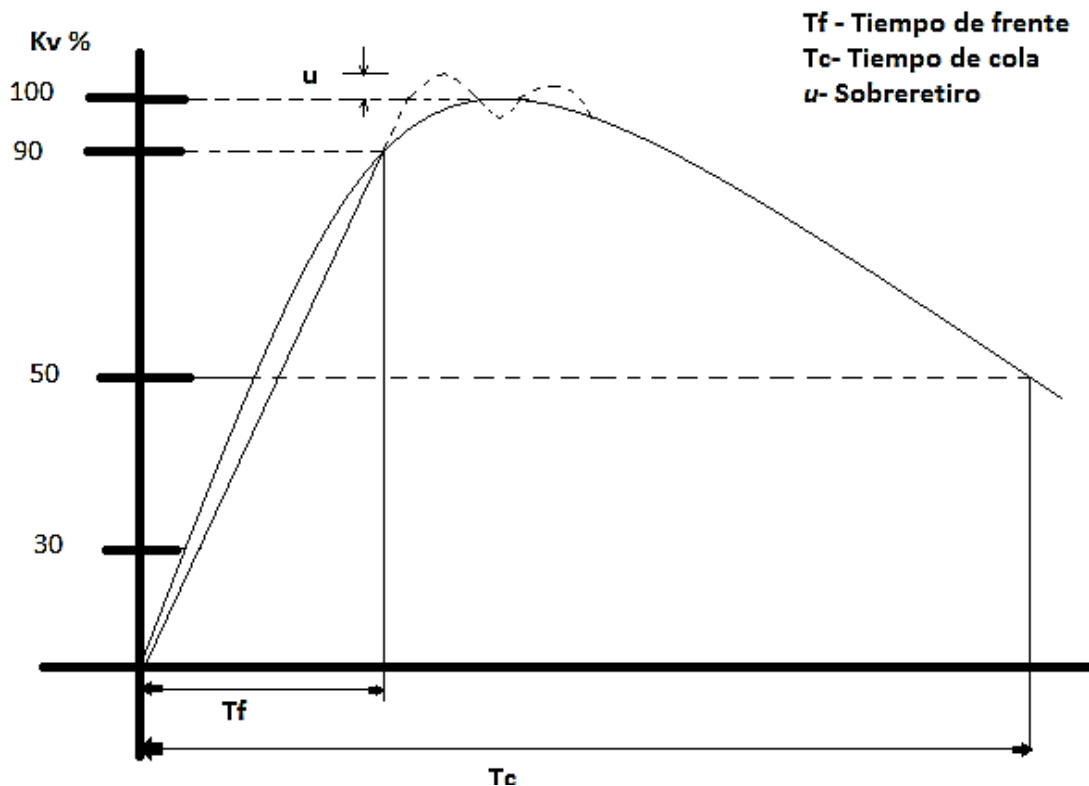


Figura 2.3 - Onda normalizada de impulso por rayo. [6]

## 2.6. Características de los aislamientos eléctricos.

Las características aislantes en las instalaciones eléctricas y los equipos eléctricos son uno de los aspectos que más costo tiene y que condiciona los avances. Los aislamientos deben soportar valores estandarizados y propuestos por las normas IEC, que se distinguen por un punto que muestra la posible coordinación entre las tensiones máxima y normal, sobretensiones de maniobra y descarga atmosférica. [1]

Conforme a su finalidad los aislamientos pueden ser distancias en aire, sólidos o los sumergidos en líquido aislante y se le clasifica para su uso externo o interno de acuerdo a su empleo en instalaciones expuestas a agentes externos, como humedad y contaminación. [1]

Otra clasificación más importante en los aislamientos es su capacidad autorrecuperable o no autorrecuperable. Los aislamientos que tienen la capacidad de recuperar su rigidez dieléctrica después de sufrir una descarga ocasionada por una sobretensión se denominan como autorrecuperables, los aislamientos líquidos y gaseosos son de este tipo, mientras que los no autorrecuperables no tienen la

capacidad de recuperar su rigidez dieléctrica después de ocurrida una descarga causada por una sobretensión, los aislamientos solidos son de este tipo. [1]

## 2.7. Rigidez dieléctrica.

Una de las características más importantes de los materiales aislantes es su rigidez dieléctrica que es el máximo gradiente de potencial que un aislante es capaz de soportar sin que sea producida una descarga disruptiva. [6]

La descarga disruptiva es una corriente eléctrica que se presenta en los dieléctricos que están sujetos a la acción de un campo eléctrico, debido a que las fuerzas coercitivas de los átomos del dieléctrico son menores que las fuerzas que tratan de mover los electrones en dirección opuesta a la intensidad del campo. [6]

La rigidez dieléctrica de un aislamiento depende de la forma de onda de tensión aplicada (pendiente del frente, valor de cresta, pendiente de cola), de la polaridad y en el caso del aislamiento externo, de las condiciones ambientales. La descarga disruptiva de un aislamiento es un fenómeno de naturaleza estadística. Esto significa que un mismo aislamiento puede aguantar unas cuantas veces y fallar otras veces aplicando de forma repetitiva la misma onda de tensión, manteniendo constantes la polaridad y las condiciones ambientales. [6]

En la siguiente tabla se dan valores de rigidez dieléctrica obtenidos experimentalmente para algunas sustancias.

**Tabla 2.2** - Valores de rigidez dieléctrica. [6]

Substancia	Rigidez dieléctrica kV/cm
Aire	30
Aceite	300
Baquelita	250
Caucho	210
Ebonita	200
Mica	2000
Papel	400
Vidrio	300
Parafina	400
Porcelana	300

## 2.8. Preámbulo de coordinación de aislamiento.

La finalidad de la coordinación de aislamiento es determinar los niveles de aislamiento necesarios en los equipos de una instalación eléctrica y que puedan resistir las sollicitaciones dieléctricas que sufran en servicio normal y en presencia de sobretensiones. [1]

Existen dos métodos de coordinación de aislamiento: determinista y estadístico. El uso de alguno de estos métodos depende de la información posible del sistema o instalación de estudio. [1]

Las sobretensiones por maniobras y por descargas atmosféricas que se originan en una red eléctrica de alta tensión tienen carácter fundamentalmente estadístico, y se suelen caracterizar mediante una función de densidad de probabilidad. El comportamiento de los materiales aislantes sometidos a ondas normalizadas tiene carácter aleatorio y se puede representar mediante una distribución estadística normal o gaussiana. Cuando el aislamiento es autorrecuperable se suele emplear la función de distribución acumulada esto significa la probabilidad de que el aislamiento falle cuando el valor de cresta de la onda de tensión normalizada que se emplea supere un valor establecido y en el aislamiento no autorrecuperable suele suponerse un valor único frontera que separa el área de fallo del área sin presencia de fallo en el aislamiento. [1]

El método de coordinación estadístico se puede aplicar cuando es posible obtener la función de densidad de probabilidad de las sobretensiones que se emplean en la selección del aislamiento. Con la distribución estadística de las sobretensiones y de la función de probabilidad de fallo del aislamiento, es posible obtener el riesgo de falla del aislamiento de un equipo frente a una sollicitación dieléctrica. Lo que permite seleccionar y dimensionar el aislamiento de forma que la frecuencia de falla se encuentre dentro de los límites aceptables. [1].

## 2.9. Nivel Básico de Aislamiento al Impulso (NBAI).

El nivel básico de aislamiento al impulso se define como el nivel de tensión que el aislamiento de un equipo debe de soportar durante un procedimiento de prueba. Durante los primeros años de los sistemas de potencia, los niveles de aislamiento fueron definidos en base a la experiencia adquirida por las compañías eléctricas. Posteriormente se formaron comités de normalización que establecieron los niveles de rigidez dieléctrica de todas las clases de equipo, definiendo los niveles básicos de aislamiento. En el caso de aislamientos autorrecuperables esta tensión NBAI está definida por la  $U_{10}\%$ . [1]



Sistemas con tensiones hasta 245 kV son probados con impulsos de rayo y a un minuto con una tensión a frecuencia nominal. Por arriba de 300 kV los sistemas son probados además con sobretensiones de impulso por maniobra. Con propósitos de normalización, han sido establecidos niveles de aislamiento en estándares nacionales e internacionales. [1]

Existen dos categorías de acuerdo a la tensión de diseño:

Categoría I: Tensión < 245 kV

Categoría II: Tensión > 245 kV

Los NBAI para estas dos categorías se muestran en las Tablas.2.3 y 2.4.

**Tabla 2.3** - Tensiones y niveles de aislamiento normalizados de la categoría I<sup>(1)</sup> [1]

Tensión nominal del sistema Vn [kV] eficaz	Tensión máxima del equipo Vm [kV] eficaz	Tensión de aguante normalizada de corta duración de 60 Hz fase a tierra [kV] eficaz	Tensión de aguante normalizada de impulso por rayo [kV] pico <sup>(2)</sup>
2.4	3.6	10	20
			40
4.4	5.5	19	45
			60
			75
6.9	7.2	20	40
			60
13.8	15.5	35	75
			95
			110
23	25.8	50	95
			125
			150
34.5	38	70	125
			150
			200
44	52	95	250
69	72.5	140	325
85 – 115	123	(185)	450
		230	550
138	145	230	550
		275	650
150 – 161	170	275	650
		325	750
230	245	360	850
		395	950
		460	1050

**Tabla 2.4** - Tensiones y niveles de aislamiento normalizados de la categoría II <sup>(2)</sup> [1]

Tensión nominal del sistema Vn [kV] eficaz	Tensión máxima del equipo Vm [kV] eficaz	Tensión de aguante normalizada de impulso por maniobra			Tensión de aguante normalizada de impulso por rayo [kV] pico
		Aislamiento longitudinal [kV] pico	Fase a tierra [kV] pico	Fase a tierra [kV] pico	
400	420	850	850	1360	1050 1175
		950	950	1425	1175 1300
		950	1050	1575	1300 1425

Especificación CFE L0000-06.

(1) Los valores de esta tabla están referidos a condiciones atmosféricas estándares normalizados (760 mmHg, 11 gr/m<sup>3</sup> y 20 °C)

(2) La tensión de aguante nominal al impulso por rayo de fase a fase es el mismo valor que el de fase a tierra.

### 2.10. Distancias dieléctricas en aire.

Las distancias en aire de fase a tierra y de fase a fase deben garantizar estadísticamente una probabilidad de flameo que resulte suficientemente baja desde el punto de vista de los criterios de diseño adoptados. Esto conduce al establecimiento de distancias mínimas de no flameo entre fase y tierra o entre fases, que se determina principalmente para los impulsos por rayo y maniobra, según los niveles de aislamiento. [2]

La tensión crítica de flameo  $U_{50\%}$  es el valor al cual ocurre el flameo en un aislamiento en el 50% de los impulsos aplicados. Con propósitos de diseño, este valor se puede obtener a partir del nivel básico de aislamiento al impulso de rayo o por maniobra de interruptores según sea el caso. De acuerdo con las recomendaciones de la Comisión Internacional de Electrotecnia en su norma IEC-71, la relación entre el nivel básico de aislamiento y la tensión crítica de flameo ( $U_{50\%}$ ) está dada por: [2]

$$NBAI = U_{50\%} (1.0 - 1.3 \sigma) \quad (2.8)$$

donde:

$NBAI$  = Nivel básico de aislamiento al impulso por rayo

$U_{50\%}$  = Tensión crítica de flameo por impulso de rayo

$\sigma$  = Desviación estándar, 3% para impulso por rayo

La relación entre los niveles de aislamiento y las tensiones críticas de flameo se puede establecer como:

$$NBAI = [(U_{50}\%)(1 - (1.3 \times 0.03))] = (0.961) (U_{50}\%), \text{ o bien:}$$

$$U_{50}\% = \frac{NBAI}{0.961} \quad (2.9)$$

Los valores de NBAI se obtienen de tablas y el factor de configuración eléctrica (k) obtenido experimentalmente. [2]

### 2.11. Condiciones Atmosféricas.

Las condiciones atmosféricas tienen gran influencia en los aislamientos externos. La tensión de contorno para un intervalo de aire se incrementa con el aumento de la densidad del aire o de la humedad. Sin embargo, cuando la humedad relativa excede el 80% la tensión de contorno se vuelve irregular, especialmente cuando el contorno se produce a lo largo de una superficie aislante. [1]

Aplicando factores de corrección, la tensión de ensayo medida bajo ciertas condiciones de temperatura, presión y humedad, se deben referir al valor de tensión que se debe utilizar en condiciones normales. [1]

$$U = U_0 k \quad (2.10)$$

donde:

$U$  = Tensión eléctrica en las condiciones atmosféricas locales

$U_0$  = Tensión disruptiva en las condiciones atmosféricas estándares

$$k = \delta^m \quad (2.11)$$

La densidad relativa del aire se obtiene por:

$$\delta = \left(\frac{b}{b_0}\right) \left(\frac{273 + t_0}{273 + t}\right) \quad (2.12)$$

Donde las temperaturas  $t$  y  $t_0$  están dadas en grados centígrados y la presión atmosférica  $b$  y  $b_0$  en kilo pascal o milibar.

Las condiciones atmosféricas normales son:

Temperatura  $t_0 = 20$  °C

Presión  $b_0 = 101,3$  kPa (1013 mbar)

Humedad absoluta  $h_0 = 11$  g/m<sup>3</sup> [1]

## 2.12. Efectos en la densidad del aire.

Los efectos de la densidad del aire indican que el campo eléctrico  $E_s$  es aproximadamente proporcional a la densidad relativa del aire  $\delta$ :

$$E_s = \delta E_{s1} \quad (2.13)$$

donde:

$E_{s1}$  = Es el gradiente del streamer

$\delta = 1$  (condiciones estándar) [7]

## 2.13. El método “Up and down”.

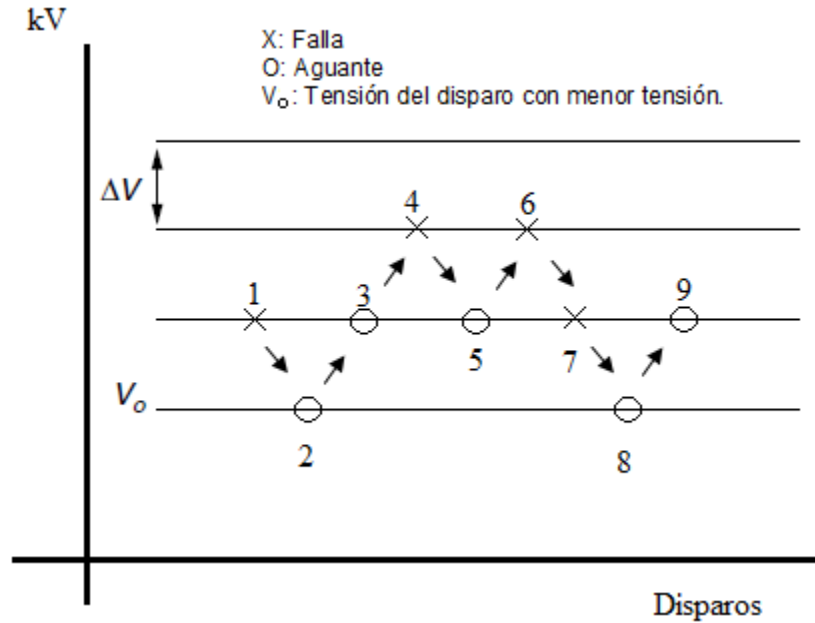
Cuando se aplican sobretensiones de impulso de rayo o maniobra, la ruptura puede suceder en el frente, el pico o en la cola de onda transitoria, por lo tanto sus valores son aleatorios. La  $U_{50}$  y su correspondiente desviación estándar se determina en forma experimental. [8]

- El método “Up and down” es el más empleado y el procedimiento es el siguiente:

Se intuye un valor de ruptura y se aplica el disparo al objeto bajo prueba. Si en este disparo se produce la ruptura, se disminuye de un 3% a 5% del valor inicial de la tensión inicial. [8]

Si se produce un aguante (no hay ruptura), se incrementa el mismo valor. Se considera 3% para el impulso por rayo y de 5% a 7% para el impulso por maniobra. Para calcular la  $U_{50}$ , es necesario realizar 30 disparos para el impulso por rayo [8]

La Figura 2.4 ilustra la secuencia con 9 disparos aplicados a un aislamiento bajo prueba. La norma IEC establece que para determinar la  $U_{50}$  de aguante se requiere de la aplicación de al menos 20 disparos, aunque pueden desecharse los primeros disparos si el valor inicial está lejos del valor de la  $U_{50}$ %. [8]



**Figura 2.4** - Secuencia con 9 disparos aplicados a un aislamiento bajo prueba. [8]

En la práctica, los puntos expresados como probabilidad de aguante son trazados en una gráfica contra el nivel de tensión  $U_i$ , usando una escala de probabilidad. Este método tiene la ventaja de que requiere menos disparos que otro método existente denominado multiniveles y por lo tanto es el más utilizado en la industria. Su desventaja es que asume una normalidad en la distribución, algo que resulta no muy preciso para determinar la desviación estándar. [8].

# Capítulo III

Comportamiento del campo eléctrico en configuraciones de electrodos bajo pruebas en alta tensión.

### 3.1. Introducción.

En las recientes décadas surge la necesidad de utilizar mejor los espacios disponibles, además de disminuir el costo de los materiales esto ha llevado a la reducción en tamaño de los equipos eléctricos. El estudio de las características aislantes de los materiales es lo que permite el desarrollo y mejoras en los equipos que conformaran las instalaciones eléctricas. [1]

La principal cualidad en los aislamientos, ya sea sólido, líquido o gaseoso es la rigidez dieléctrica ( $E_c$ ). La rigidez dieléctrica proviene de dividir el máximo nivel de tensión eléctrica que soporte el aislamiento y la distancia entre electrodos; esta cualidad tiene dependencia de otros factores, como la forma de la onda de tensión, polaridad, de condiciones ambientales como la presión atmosférica, niveles de contaminación, y la forma y naturaleza de los electrodos. [1]

Cuando se proyecta un equipo eléctrico se evalúa la tensión disruptiva del aislamiento tomando en cuenta el campo eléctrico  $E_{max}$  que la configuración alcanza y el valor de la rigidez dieléctrica. Después de elaborar la configuración se estima la tensión eléctrica que soporta el aislamiento mediante ensayos de alta tensión basados en procedimientos normalizados según la IEC60060-1. [1]

La ruptura del dieléctrico en los aislamientos es un fenómeno estadístico, y la probabilidad de que suceda dicha ruptura aumenta conforme el nivel de tensión es mayor. Una de las funciones de probabilidad que mejor representa el comportamiento de los diversos aislamientos eléctricos es la distribución de Gauss; solo está definida por dos parámetros: el valor promedio ( $U_{50}$ ) y la desviación estándar,  $\sigma$  (diferencia entre el valor medio y la tensión de 16% de probabilidad de producir descarga). [1]

### 3.2. Métodos para la obtención del campo eléctrico en sistemas aislantes.

Durante la fase de proyección de los elementos eléctricos es significativo conocer la distribución del campo eléctrico  $E$  en la superficie de los electrodos y en los aislamientos, sobretodo en las superficies frontera. El entendimiento de la distribución del campo eléctrico permite estimar la exigencia eléctrica a la que son sujetos los materiales aislantes y su rigidez dieléctrica ya en funcionamiento. Existen varias técnicas para el cálculo de campos eléctricos, los cuales pueden clasificarse en tres grupos: métodos analíticos, simulación experimental y métodos numéricos. Estos últimos son los más utilizados actualmente. [1]

Se puede calcular el campo eléctrico usando métodos experimentales, como el del papel conductor con resistividad homogénea para sistemas bidimensionales o para sistemas tridimensionales con simetría axial. En estos métodos

experimentales, la resistividad homogénea del medio aislante posibilita fijar una analogía entre la electrostática y la conducción eléctrica. Estos métodos han sido suplidos por modernos métodos numéricos aunque siguen siendo de interés didáctico. [1]

Entre los métodos numéricos más utilizados actualmente es el de las diferencias finitas por ser el más sencillo de aplicar, el de los elementos finitos y el método de simulación de cargas. [1]

En el método de las diferencias finitas se divide el espacio a estudiar en un mallado rectangular para sistemas bidimensionales o en paralelepípedos en sistemas tridimensionales, en los nodos se determina el potencial eléctrico, en el interior de la celda unidad se considera una cierta distribución de tensión, por ejemplo lineal. En cada nodo se desarrolla la ecuación de Laplace en series de Taylor despreciando los términos a partir de un cierto orden, dependiendo de la exactitud requerida. El procedimiento se aplica a todos los nodos del contorno de los electrodos cuyo potencial es conocido. Con las ecuaciones lineales obtenidas de este planteamiento se determina la tensión en cada nodo. [1]

### 3.3. Uniformidad del campo eléctrico.

La disposición de los materiales aislantes cuando se aplica una tensión eléctrica establecida ( $U$ ) entre dos electrodos no solo depende de las propiedades aislantes de los materiales, sino del arreglo geométrico. [1]

En la proyección del sistema aislante se debe determinar la distribución del campo eléctrico en todo el aislamiento y determinar el máximo valor ( $E_{max}$ ) previsto. El material aislante soporta la diferencia de tensión entre los electrodos si se cumple la condición  $E_{max} \leq E_c$  por lo cual es necesario conocer el valor de la rigidez dieléctrica ( $E_c$ ) del arreglo aislante para la forma de onda de la tensión aplicada y el del campo eléctrico máximo ( $E_{max}$ ) que aparece en el arreglo de electrodos. [1]

La Figura 3.1 muestra un arreglo de electrodos punta-plano en un medio aislante homogéneo que sirve para explicar el concepto de uniformidad del campo eléctrico. La homogeneidad del medio aislante y la distancia al plano de tierra ( $d$ ); se consideran parámetros invariables, y el diámetro ( $D$ ) de la punta variable. [1]

En cada diámetro  $D$  de la punta se tiene un valor diferente de campo eléctrico máximo  $E_{max}$ . El campo eléctrico medio  $E_m$  es establecido por la división de la tensión  $U$  de la punta con respecto a tierra entre la distancia de los electrodos: [1]

$$E_m = U/d \quad (3.1)$$



donde:

$E_m$ : campo eléctrico medio

$U$ : tensión eléctrica

$d$ : distancia al plano de tierra

El factor de uniformidad del campo eléctrico  $\eta$ , se define por la siguiente relación: [1]

$$\eta = \frac{E_m}{E_{max}} \quad (3.2)$$

donde:

$\eta$ : Factor de uniformidad del campo eléctrico

Cuando  $\eta$  toma el valor unidad significa que el campo es homogéneo  $E_{max} = E_m$ , y cuanto más cerca esté de cero, tanto más divergente será el campo (diámetro de punta muy pequeño). [1]

La ecuación anterior puede expresarse de la siguiente forma: [1]

$$E_m = \frac{U}{d} = \eta E_{max} \quad (3.3)$$

donde:

$E_m$ : Campo eléctrico medio

$U$ : Tensión eléctrica

$d$ : Distancia al plano de tierra

$\eta$ : Factor de uniformidad del campo eléctrico

$E_{max}$ : Campo eléctrico máximo

La tensión de flameo  $U_c$  se produce cuando el campo eléctrico máximo  $E_{max}$  alcance el valor de la rigidez dieléctrica del aislamiento  $E_c$ . Por tanto sustituyendo el valor de la rigidez dieléctrica por el del campo eléctrico máximo en (3.3) queda la siguiente expresión: [1]

$$U_c = E_c d \eta \quad (3.4)$$

donde:

$U_c$ : Tensión de flameo

$E_c$ : Valor de rigidez dieléctrica del aislamiento

$d$ : Distancia al plano de tierra

$\eta$ : Factor de uniformidad del campo eléctrico

Suponiendo que en la anterior ecuación dejemos invariables los valores de la rigidez dieléctrica ( $E_c$ ) y la distancia ( $d$ ), se pueden demostrar los efectos de

disminución de la tensión de flameo ( $U_c$ ) cuando el campo eléctrico presenta bajos valores de uniformidad ( $\eta$ ). [1]

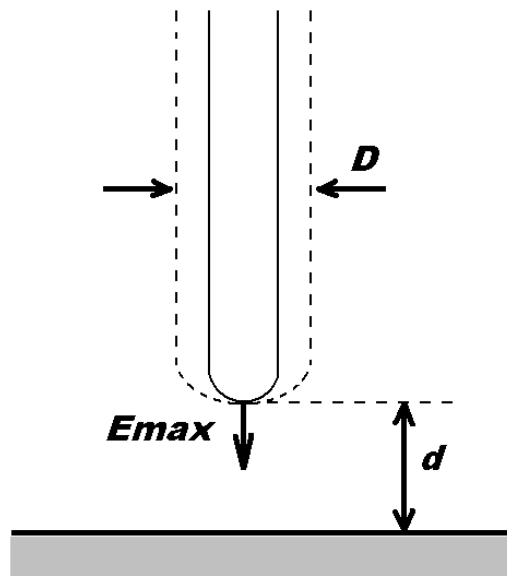


Figura 3.1 - Configuración punta-plano. [1]

### 3.3.1 Campo eléctrico en configuraciones sencillas.

#### a) Campo eléctrico uniforme.

En la Figura 3.2 en dos superficies separadas a una cierta distancia se les aplica una diferencia de tensión generándose un campo eléctrico homogéneo y las superficies equipotenciales son paralelas y se reparten uniformemente en el medio aislante, por lo cual el campo eléctrico es constante en cualquier punto del al interior del dieléctrico. [1]

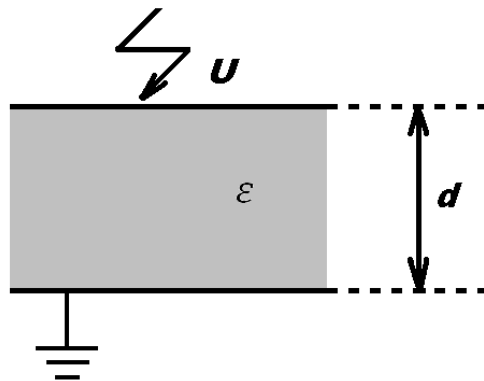


Figura 3.2 - Campo eléctrico homogéneo. [1]

$$E_{max} = E_m = \frac{U}{d} \quad (3.5)$$

donde

$E_{max}$ : Campo eléctrico máximo

$E_m$ : Campo eléctrico medio

$U$ : Tensión eléctrica

$d$ : Distancia al plano de tierra

## **b) Influencia de la configuración en el campo eléctrico.**

### **Campos homogéneos.**

Los campos homogéneos se presentan en pocos arreglos, como ejemplo en el diseño de interruptores de hexafluoruro de azufre, en las subestaciones aisladas en gas (GIS, por sus siglas en inglés), en equipos de laboratorio (explosores de esferas, etc.). La tensión disruptiva en campos homogéneos coincide con la tensión de inicio de efecto corona (tensión de ionización). [1]

### **Campos no homogéneos. Efecto corona.**

Los campos no homogéneos son los más habituales en la mayor parte de las instalaciones de altas tensiones al aire. En ellos pueden producirse descargas parciales (descargas corona) en las proximidades de los conductores sin que se llegue a puentear la distancia entre electrodos. [1]

Las descargas por efecto corona aparecen a un nivel de tensión muy inferior al necesario para alcanzar la descarga disruptiva entre electrodos en los puntos del conductor de menor curvatura, donde la intensidad de campo eléctrico es mayor. Si la tensión aumenta la descarga se hace visible y con mayor tensión en estas zonas aparece un halo resplandeciente de color blanco azulado. Este fenómeno viene acompañado por un zumbido y por la aparición de ozono. [1]

En campos no homogéneos, también llamados divergentes, tales como punta-plano, el coeficiente de ionización neta  $\bar{\alpha}$  varía a lo largo del espacio entre electrodos, a diferencia de lo que sucede con campos homogéneos en los que  $\bar{\alpha}$  permanece constante [1]. La condición de inicio de descarga se establece por la expresión:

$$\int_0^{x_c} \bar{\alpha} dx = \ln(N_c) \quad (3.6)$$

donde  $N_c$  es la concentración crítica de iones ( $N_c = 10^8$ ) a la distancia  $x_c$  que provoca una avalancha de electrones suficiente para el inicio de un streamer. La representación gráfica de la ecuación (3.6) para una configuración punta-plano se muestra en la Figura 3.3.

En líneas de alta tensión para el transporte de energía eléctrica el campo eléctrico es fuertemente inhomogéneo ( $\eta \leq 0.1$ ) siendo fácil que aparezca el efecto corona. El efecto corona es causa de pérdidas de energía y de perturbaciones radioeléctricas indeseables. [1]

Además, puede provocar la degradación del aislamiento sólido de los aisladores de material compuesto por la aparición de óxidos nítricos que con agua forman ácido nítrico. [1]

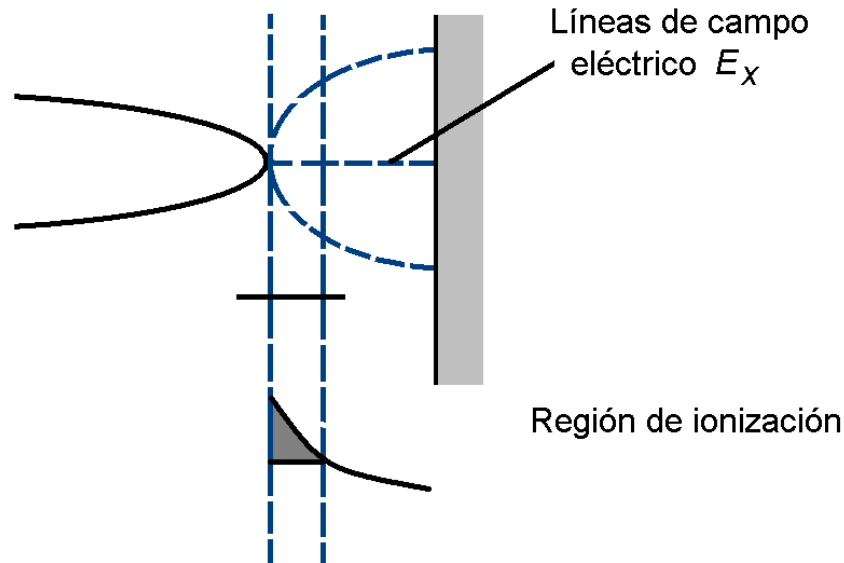


Figura 3.3 - Descarga disruptiva en campo no homogéneo. [1]

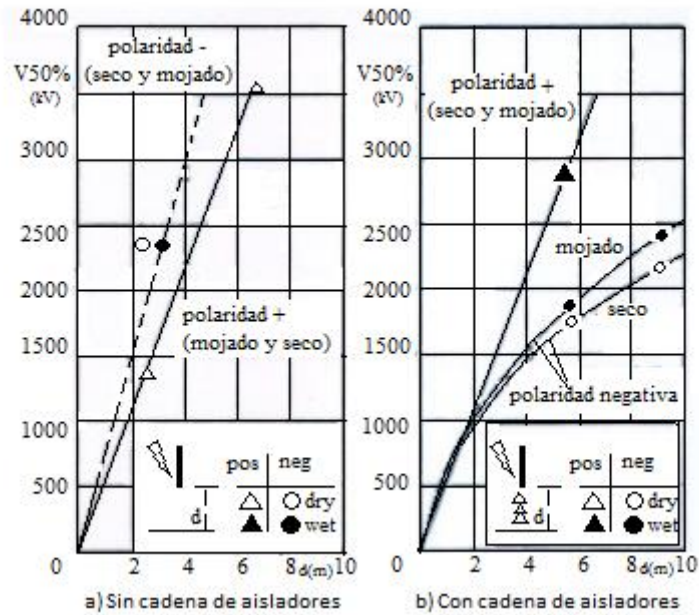
### c) Influencia de la forma de onda de tensión en la tensión disruptiva.

Las tensiones de descarga disruptiva para campo homogéneo o cuasi-homogéneo están muy poco afectadas por la forma de onda y la polaridad de la tensión aplicada (tensión alterna, tensiones de frente lento y tensiones de frente rápido), mientras que para campos claramente no uniformes ( $\eta \leq 0.1$ ) sí lo están. [1]

## 3.4. Influencia de las formas de electrodos en tensiones de descarga para los espacios de aire en las pruebas de impulso por rayo.

### a) Distancias en aire con y sin elementos aislantes entre electrodos.

Las pruebas confirman que las curvas que expresan la tensión de descarga en función de la distancia de separación (Figura 3.4) pueden ser trazadas con buena aproximación como una línea recta pasando a través del origen de los ejes; que se puede considerar para cada distancia entre electrodos constante. [9]

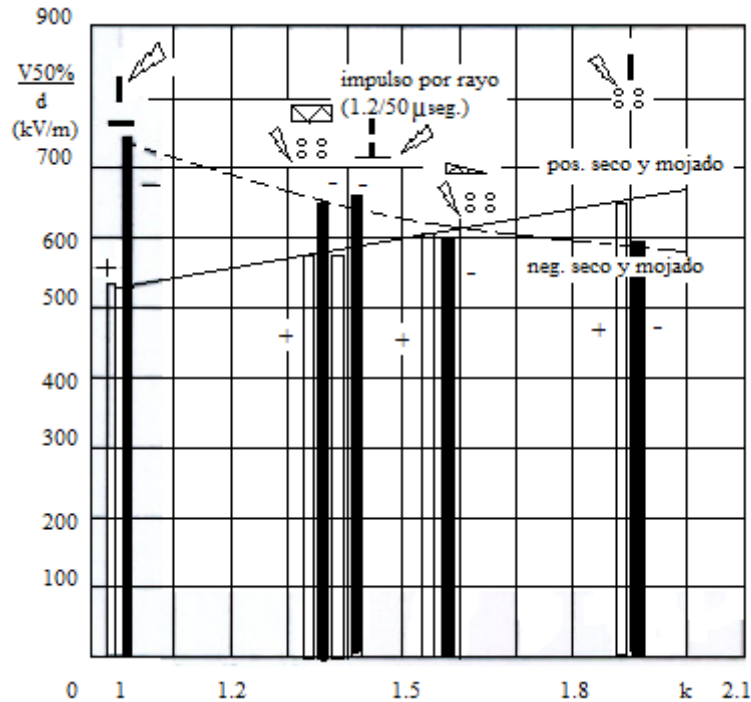


**Figura 3.4** - Resultados de impulso por rayo ( $1.2/50 \mu s$ ) en distancias de aire con y sin cadenas de aisladores entre electrodos. [9]

La influencia de la forma de los electrodos y polaridad de la onda es menor que en el caso de impulsos por maniobra. Es interesante notar, sin embargo, que esta influencia opera en la misma dirección que para los impulsos por maniobra. [9]

Las tensiones de descarga para los impulsos por rayo se representan como una función del explosor para el factor  $k$  definido por la polaridad positiva de impulsos por maniobra. Son curvas continuas detalladas para ambas polaridades positiva y negativa, como se muestra en la Figura 3.5. [9]

Se desprecia la influencia de lluvia para fines prácticos. En la Figura 3.5 las pruebas fueron elaboradas para condiciones secas, por lo tanto, se realiza una validez de las pruebas bajo condiciones de humedad. [9]



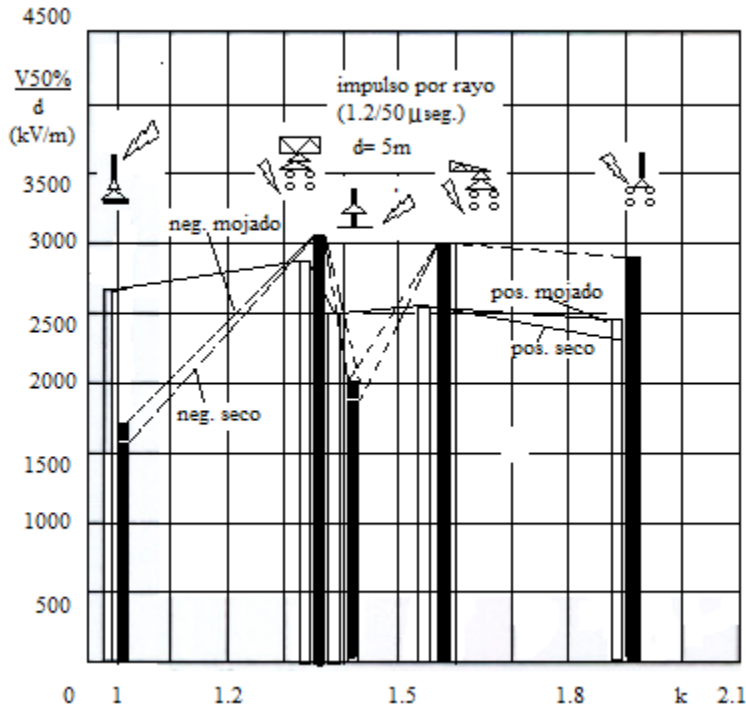
**Figura 3.5** - Tensión de ruptura al 50% de impulso por rayo para distancias de aire sin cadenas de aisladores como función del explosor para el factor  $k$ . [9]

Las curvas de la Figura. 3.5 también son reportadas en la Figura 3.7 para mostrar en un diagrama todas las curvas expresando el comportamiento de las distancias de aire como una función de  $k$ . [9]

### b) Distancias en aire con elementos aislantes entre electrodos.

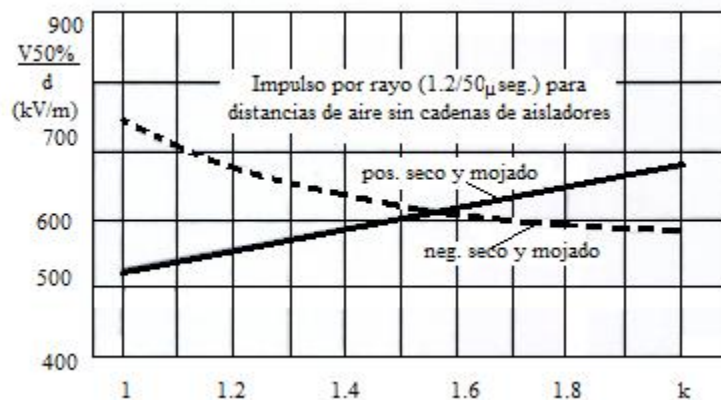
Colocando una cadena de aisladores entre los electrodos de una distancia en aire generalmente produce, para impulsos por rayo, un cambio considerable en el comportamiento de la distancia en aire. De hecho, mientras para todas las distancias de aire sin cadenas de aisladores sus características para la tensión de descarga de separación son, como ya se ha dicho, líneas rectas que pasan por el origen de los ejes, se puede observar que para cierto tipo de distancias en aire con cadenas de aisladores y, en general para una de las dos polaridades de las ondas, la saturación de la tensión de descarga puede ser aún mayor que la encontrada en el caso de impulso por maniobra. [9]

El comportamiento encontrado de ninguna manera se relaciona con el explosor para el factor  $k$  y no es posible, para distancias de aire con cadenas de aisladores, trazar curvas continuas que expresan tensiones de descarga por impulso como una función de este factor (ver Figura 3.6). [9]



**Figura 3.6** - Tensión de ruptura al 50% de impulso por rayo para distancias de aire con cadenas de aisladores como función del explosor para el factor  $k$ . [9]

Para distancias de aire con cadena de aisladores, la lluvia parece tener un efecto ventajoso, especialmente en casos en los cuales hay una saturación considerable para la tensión de descarga bajo pruebas en condiciones secas. Bajo condiciones húmedas no es posible establecer ninguna relación entre las tensiones de descarga por impulso y el factor del explosor  $k$  (ver Figura 3.6). [9]



**Figura 3.7** - Diagrama para evaluar la característica de descarga de distancia de aire en la base del explosor para el factor  $k$ . [9]

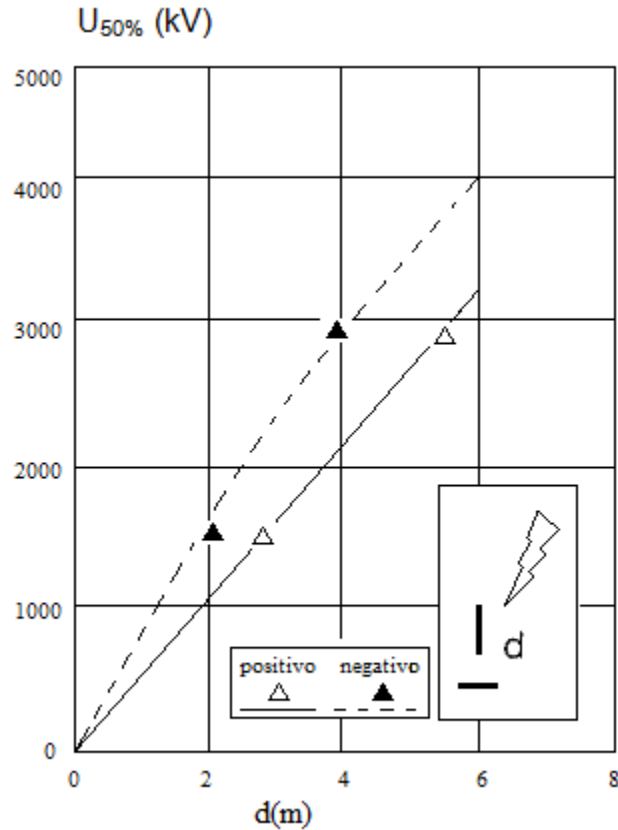
- Para las pruebas de impulso por rayo la influencia de la forma de los electrodos es mucho más grande que para el caso de distancias de aire con cadena de aisladores entre los electrodos. [9]
- El comportamiento de distancias de aire sin cadenas de aisladores entre los electrodos, para pruebas de impulso por rayo, el clima bajo condiciones secas y húmedas, para ondas con polaridad negativa y positiva, pueden ser expresadas comprensiblemente por medio del factor electródico  $k$ , definido por distancias de aire sin cadenas de aisladores y para pruebas bajo condiciones secas con polaridad positiva (ver Figura 3.7). [9]
- La forma de los aisladores tiene poca influencia en el comportamiento de las distancias de aire, cuando no se consideran aisladores de algún tipo en especial. Por lo tanto, el efecto de introducir una cadena de aisladores entre los electrodos puede ser considerada generalmente, dejando el tipo de aisladores fuera de consideración. [9]

### **3.5. Rigidez dieléctrica bajo sobretensiones de frente de onda rápido en referencia a condiciones ambientales.**

#### **Distancias de aire (sin aislamientos).**

Ejemplos de los resultados obtenidos son mostrados en la Figura 3.8, el cual reporta la  $U_{50}$  para punta-plano. Los datos se refieren a condiciones secas incluso si otros datos indican que la influencia de lluvia es insignificante para configuraciones sin aislamiento en el explosor. [10]

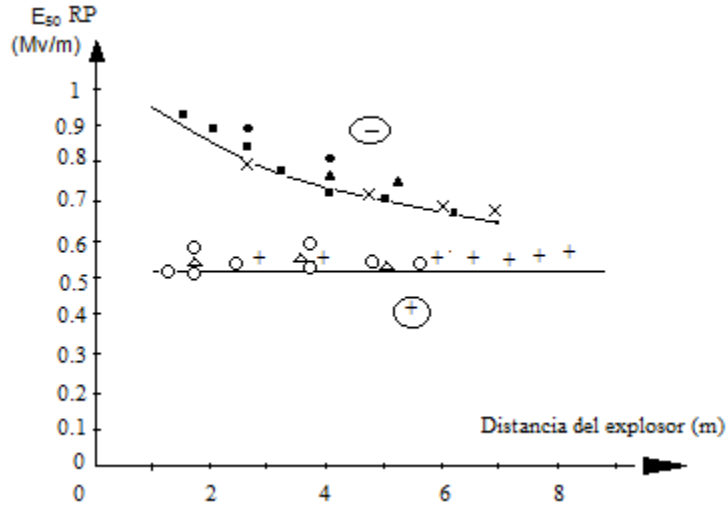




**Figura 3.8** - Resultados de pruebas de impulso por rayo (1.2/50  $\mu$ s) en configuración punta plano sin aislamientos. [10]

Para la configuración punta-plano la  $U_{50}$  con polaridad negativa es mucho mayor que con polaridad positiva. Además, la  $U_{50}$  cuando se gráfica contra la distancia de aire entre electrodos es no lineal con polaridad negativa mientras que es lineal con polaridad positiva. [10]

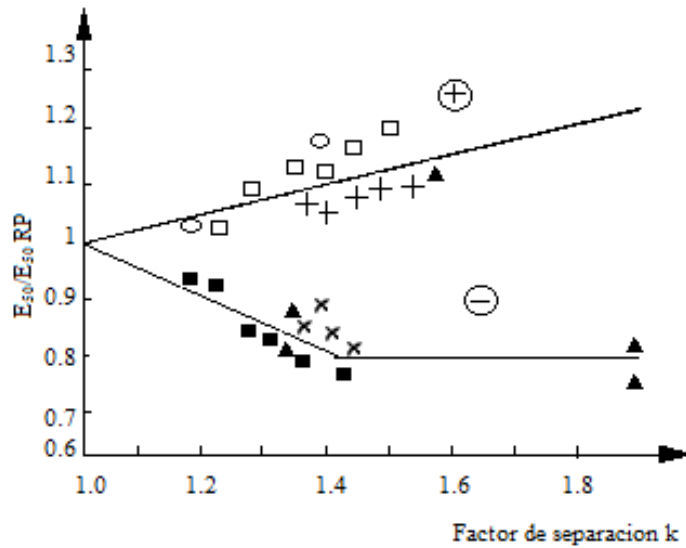
Una generalización de la influencia de la geometría del explosor (distancia y configuración) en la  $U_{50}$  se puede ver en las Figuras 3.9 y 3.10. [10]



**Figura 3.9** - Configuración punta-plano sin aislamientos en el explosor. Promedio de la  $U_{50}$  bajo impulsos por rayo como una función de la distancia del explosor. [10]

La Figura 3.9, la cual indica la configuración punta-plano, da el promedio del gradiente en el explosor ( $E_{50} = U_{50}/d$ ) bajo polaridades positiva y negativa, el 50% de probabilidad de descarga como una función de la distancia del explosor ( $d$ ). Con polaridad positiva,  $E_{50}$  tiene un valor de alrededor de  $500 \text{ kV/m}$ , independientemente de la distancia. Con polaridad negativa,  $E_{50}$  es mayor que la polaridad positiva y disminuye cuando la distancia entre los explosores aumenta. [10]

La Figura 3.10 indica los valores para la configuración de los electrodos, da el valor de  $E_{50}$  en p.u., para un  $E_{50}$  de punta-plano como una función del factor electródico  $k$  de la configuración con impulso de maniobra. Es evidente que la  $E_{50}$  con polaridad positiva tiende a incrementar cuando incrementa  $k$ , mientras que con polaridad negativa se encuentra una tendencia opuesta. [10]



**Figura 3.10** - Configuración sin aislamientos en el explosor. [10]

Combinando la información de las Figuras 3.9 y 3.10 se puede encontrar que el valor de  $E_{50}$  es mayor para la polaridad negativa que para la tensión con polaridad positiva cuando  $k$  se aproxima a 1. Cuando el valor de  $k$  está alrededor de 1.3 -1.4 (valores típicos para configuraciones de línea y estación) se aproxima a los dos valores. Finalmente, la polaridad negativa se hace más crítica cuando se consideran los mayores factores del explosor. [10]

# Capítulo IV

Pruebas dieléctricas y simulaciones.

## 4.1 Introducción.

La descarga disruptiva en un aislamiento gaseoso empieza con un proceso de ionización causado por los electrones libres que son acelerados por el campo eléctrico aplicado. Con esos electrones libres se puede originar lo que se denomina como avalancha electrónica que ioniza los átomos neutros y las moléculas, y libera nuevos electrones. La descarga disruptiva del aislamiento tiene lugar cuando la avalancha electrónica consigue atravesar el espacio comprendido entre los electrodos. La avalancha electrónica se iniciará si el valor del campo eléctrico aplicado entre electrodos supera el umbral de efecto corona, pero la descarga disruptiva o contorneo sólo tendrá lugar si el campo eléctrico es suficientemente elevado. [2]

El tiempo de ruptura, hasta que se consigue la descarga disruptiva total, se descompone en tres periodos: [1]

- Inicialmente se debe originar el efecto corona que arranque o acelere los electrones libres que terminarán provocando la avalancha electrónica, para lo cual se necesita que transcurra lo que se conoce como tiempo hasta la aparición del efecto corona. [1]
- El tiempo de propagación de los caminos precursores del arco, que disminuye conforme aumenta el valor del campo eléctrico aplicado.
- Finalmente, el tiempo de propagación del canal conductor. [1]

En general, el tiempo de aparición del efecto corona es despreciable frente a los otros dos y depende de la intensidad del campo eléctrico aplicado. [1]

La propagación del canal conductor (leader) puede terminar en un contorneo entre electrodos si el campo eléctrico aplicado permanece suficientemente elevado. [1]

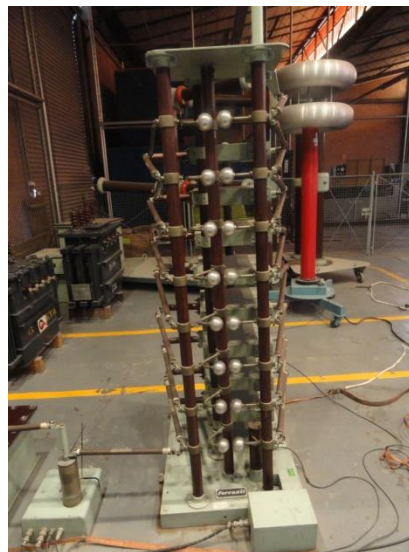
La dependencia de la rigidez dieléctrica de un aislamiento gaseoso respecto a la forma de la onda de tensión aplicada se cuantifica mediante las curvas tensión – tiempo. Un aislamiento soporta una onda de tensión normalizada si el valor de cresta no es suficientemente elevado. Al aumentar el valor de cresta de la onda, se puede llegar a la descarga disruptiva que inicialmente se producirá en algún instante de la cola de tensión, es decir, después de haber alcanzado el valor de cresta de la onda. Si se aumenta el valor de cresta, la descarga disruptiva podrá ocurrir en el mismo instante en el que se alcanza el valor máximo de la onda. Finalmente, si todavía se aumenta más el valor de cresta, la descarga puede aparecer en algún instante durante el frente de onda, antes de haberse alcanzado el valor máximo. El comportamiento del aislamiento líquido es similar al descrito para aislamiento gaseoso y puede describirse con el mismo modelo. En el aislamiento sólido la descarga disruptiva puede aparecer con distintos

mecanismos de ruptura (electromecánica, térmica, electroquímica, descargas parciales), siendo en algunas ocasiones provocada por una combinación de causas. [1]

#### 4.2. Equipo (datos de placa).

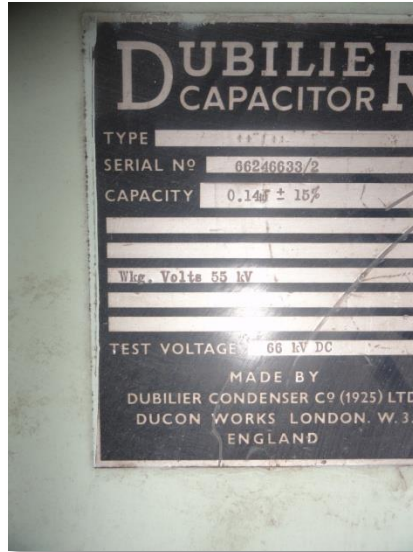
A continuación se muestran los equipos con los que se realizan las pruebas de aislamiento eléctrico, aplicando impulsos de alta tensión de polaridad positiva entre un arreglo de electrodos punta-plano.

En la Figura 4.1 puede visualizarse el generador de impulsos de Marx que se utilizó en la realización de las pruebas de impulso tipo rayo que se encuentra en el laboratorio de altas tensiones de la ESIME Zacatenco del IPN y que consta de ocho escalones o etapas con explosores de esfera, lo que indica que la tensión inicial  $V_i$  es elevada tal cantidad de veces, obteniendo así la tensión requerida para realizar las pruebas de impulso tipo rayo, lo cual genera una onda de frente rápido de tensión normalizada de 1.2/50  $\mu$ s.



**Figura 4.1** - Generador de impulsos de Marx.

En la Figura 4.2 se muestran los datos de placa de los capacitores con los que se carga cada etapa del generador de impulsos de Marx. Se muestra la máxima capacidad a la que se pueden cargar los capacitores.



**Figura 4.2** - Datos de placa de los capacitores.

En la Figura 4.3 se observa la consola de mando. Con este equipo controlamos los disparos de alta tensión que generan la ruptura en el dieléctrico, que en este caso son distancias de aire sin cadenas de aisladores en un ambiente sin humedad; disminuyendo la tensión cuando ocurre la ruptura, y aumentando la tensión cuando no existe ruptura (aplicando el método de up and down visto previamente al final del segundo capítulo).



**Figura 4.3** - Consola de mando.

En la Figura 4.4 se muestra el equipo que se utiliza para la rectificación de la onda y el sentido de polaridad del impulso normalizado tipo rayo; es importante verificar que la polaridad sea la requerida para el tipo de pruebas a realizar.



**Figura 4.4** - Control de tensión en C.A y rectificación.

En la Figura 4.5, se muestran los datos de placa del control de tensión en C.A y la tensión rectificada que genera el control para el impulso por rayo.



**Figura 4.5** - Datos de placa del control de tensión en C.A y rectificación.

En la Figura 4.6 se muestra el electrodo con punta de perfil cónico que se utiliza para la realización de las pruebas, sus características son:

Material: latón  
Altura: 0.73 m.  
Ancho: 0.02 m.





**Figura 4.6** - Punta cónica de latón.

En la Figura 4.7 se observa el electrodo punta de perfil hemisférico; cuyas características son:

Material: latón  
Altura: 0.75 .m.  
Ancho: 0.02 m.

También se puede observar la máxima distancia que se utiliza en estas pruebas, que es de 0.3 m.



**Figura 4.7** - Punta hemisférica de latón.

En la Figura 4.8 se aprecian los diferentes termómetros con que cuenta el laboratorio de altas tensiones, para que la medición de la temperatura ambiente sea más precisa y porque las mediciones registradas se necesitan estandarizar posteriormente.



**Figura 4.8** - Termómetros.

### **4.3. Desarrollo.**

El 50% de la tensión de ruptura ( $U_{50}$ ) fue medida mediante la aplicación del método up and down por lo menos con 15 disparos para cada distancia, y usando pasos aproximadamente de 11.11% de la tensión inicial.

La prueba fue realizada con impulsos de polaridad positiva, sin cadena de aisladores y en condiciones secas. La temperatura ambiente fue medida antes de la prueba y al final para la posterior corrección de las condiciones atmosféricas.

Llevamos a cabo la prueba para dos tipos de perfiles diferentes: punta hemisférica y punta cónica, variando las distancias cada 5 cm de 0 a 30 cm y empleando la configuración de electrodos punta-plano.

Cada vez que se cambiaba la distancia entre el arreglo de electrodos bajo prueba se limpiaba la placa de metal aterrizada y el perfil punta para eliminar contaminantes del ambiente.

No se realizaron las pruebas a mayores distancias por la capacidad del generador de impulso de Marx.



**Figura 4.9** - Configuración electródica punta-plano.

En la Tabla 4.1 se pueden ver los valores obtenidos después de 15 disparos variando las distancias entre electrodos.

### **Punta hemisférica.**

**Tabla 4.1** - Valores de prueba en punta hemisférica [kV].

5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm
72	88	104	136	160	176
64	96	96	128	152	168
56	88	104	120	160	176
48	96	96	112	152	168
56	88	104	120	160	176
64	80	112	128	168	168
72	88	120	120	176	176
64	80	112	128	168	168
72	88	104	136	160	160
64	80	96	144	168	168
56	72	104	136	160	176
64	80	96	128	168	168
72	88	104	136	176	176
64	80	96	144	168	168
56	88	104	152	160	160

Con los valores de  $U_{50}$  obtenidos se calcula un promedio para cada distancia (ver Tabla 4.2):

$$U_{50} = \frac{\sum V_i}{n} \quad (4.1)$$

**Tabla 4.2** - Promedio de  $U_{50}$  en perfil hemisférico [kV].

5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm
62.933	85.333	103.467	131.2	163.733	170.133

Para la punta cónica se realiza el mismo procedimiento que con la punta de perfil hemisférico y se obtienen los valores que se pueden ver en la Tabla 4.3.

### Punta cónica.

**Tabla 4.3** - Valores de prueba en punta cónica [kV].

5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm
56	72	88	104	120	144
48	64	96	96	128	136
56	72	88	104	120	144
48	64	96	112	112	136
56	72	88	104	120	144
48	64	80	112	112	136
40	72	88	104	120	128
48	80	96	96	112	136
56	72	88	104	120	128
48	80	80	112	128	136
56	72	88	120	120	128
48	80	96	112	112	136
56	72	88	104	120	144
48	80	96	96	112	136
56	72	88	104	120	144

Se realiza el mismo cálculo de promedio de la  $U_{50}$  para cada distancia como en el perfil hemisférico.

**Tabla 4.4** - Promedios de  $U_{50}$  en perfil cónico [kV].

5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm
51.2	72.533	89.6	105.6	118.4	137.067

Con los valores obtenidos se procede a graficar para comparar los resultados. En la Figura 4.10 se muestra una gráfica que muestra el comportamiento de la  $U_{50}$  a medida que variamos la distancia para los dos perfiles.

Nos podemos dar cuenta que existe una diferencia del valor de tensión requerida para que se presente la ruptura del dieléctrico entre los electrodos: la  $U_{50}$  para la punta hemisférica es mayor con respecto a la punta cónica. Esto se debe al efecto punta, ya que existe una mayor concentración de campo eléctrico en la punta del perfil cónico que en la punta del perfil hemisférico dada su menor superficie.

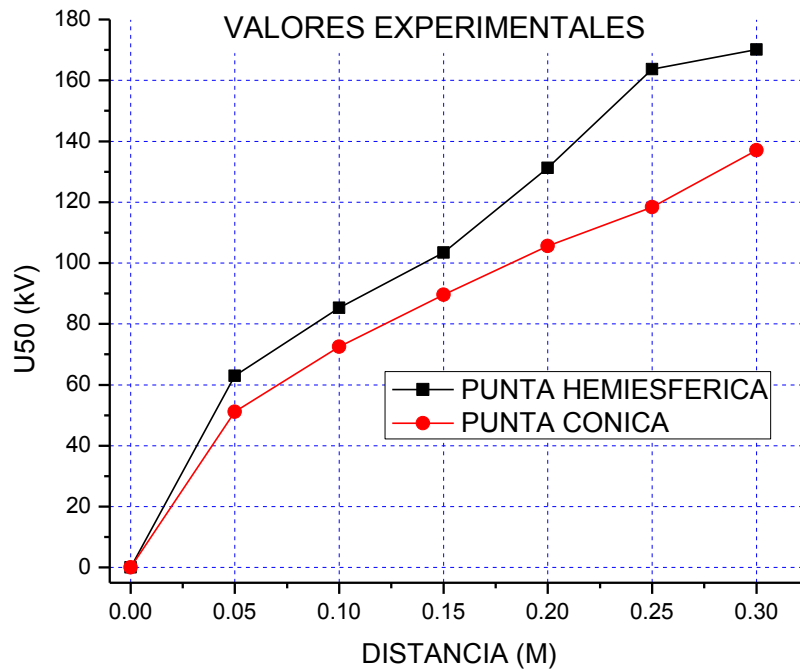


Figura 4.10 - Resultado de pruebas de impulso por rayo en configuración punta-plano.

#### 4.4. Correcciones atmosféricas.

Se corrigen los resultados obtenidos a los estándares para poder obtener el modelo matemático y para que se pueda utilizar en cualquier parte del mundo. Se toman en cuenta las condiciones atmosféricas donde se quiere utilizar el modelo matemático, es decir, las condiciones atmosféricas locales. Procedemos a corregir nuestros valores obtenidos a los estándares con las siguientes formulas:

$$U_{ESIME} = U_0 k \quad (2.10)$$

$$\delta = \left(\frac{b}{b_0}\right) \left(\frac{273 + t_0}{273 + t}\right) \quad (2.12)$$

La temperatura que obtuvimos cuando se realizaron las pruebas fue de 20° C y la presión atmosférica en la Ciudad de México es de 577 mmHg.

$$\delta = \left(\frac{577}{760}\right) \left(\frac{273 + 20}{273 + 20}\right) = 0,76 = k$$

Con estos datos se obtiene una densidad del aire para la Ciudad de México de 0.76.

Por lo tanto, para calcular la  $U_0$  (al nivel del mar) se utiliza la  $U_{ESIME}$  entre  $k$  (que es igual a la densidad).

$$U_0 = \frac{U_{ESIME}}{k}$$

Se obtienen los valores que se ven en la Tabla 4.5 y 4.6. Se comparan estos valores de ruptura con los valores de las Tablas 4.2 y 4.4, se puede observar que la  $U_{50}$  a condiciones estándares es mayor en comparación a la  $U_{50}$  con las condiciones atmosféricas de la Ciudad de México; esto se debe a que la densidad del aire es diferente, existe una mayor densidad relativa del aire a nivel del mar provocando que se necesite una **tensión mayor** para que exista una ruptura del dieléctrico, mientras que en la Ciudad de México se necesita una **tensión menor** para que exista la ruptura porque la densidad del aire es menor.

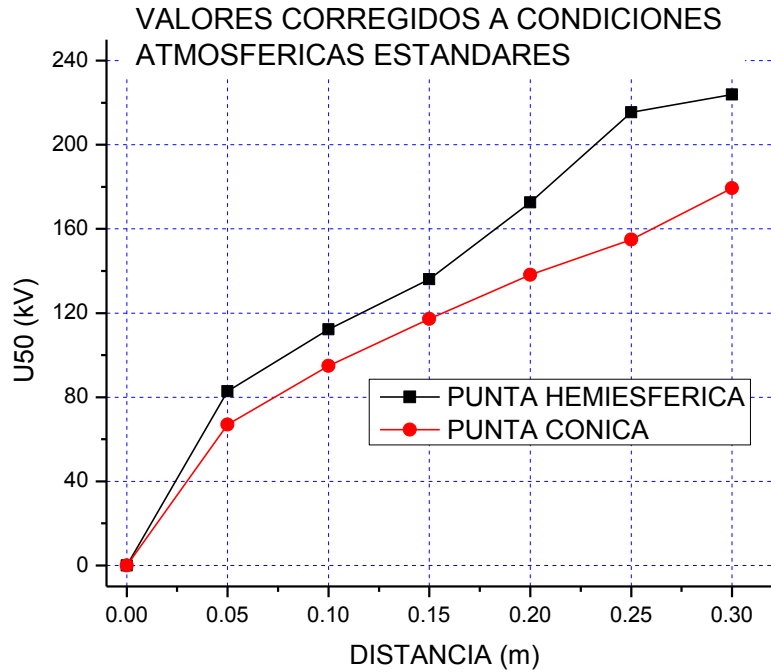
**Tabla 4.5** - Corrección atmosférica a nivel estándar punta hemisférica [kV].

5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm
82.807	112.280	136.140	172.631	215.438	223.859

**Tabla 4.6** - Corrección atmosférica a nivel estándar punta cónica [kV].

5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm
67.016	94.939	117.277	138.220	154.974	179.407

En la Figura 4.11 se observa cómo quedan graficados los valores corregidos a nivel estándar para los dos perfiles y nos podemos dar cuenta que la  $U_{50}$  aumenta con respecto a los valores de la Figura 4.10.

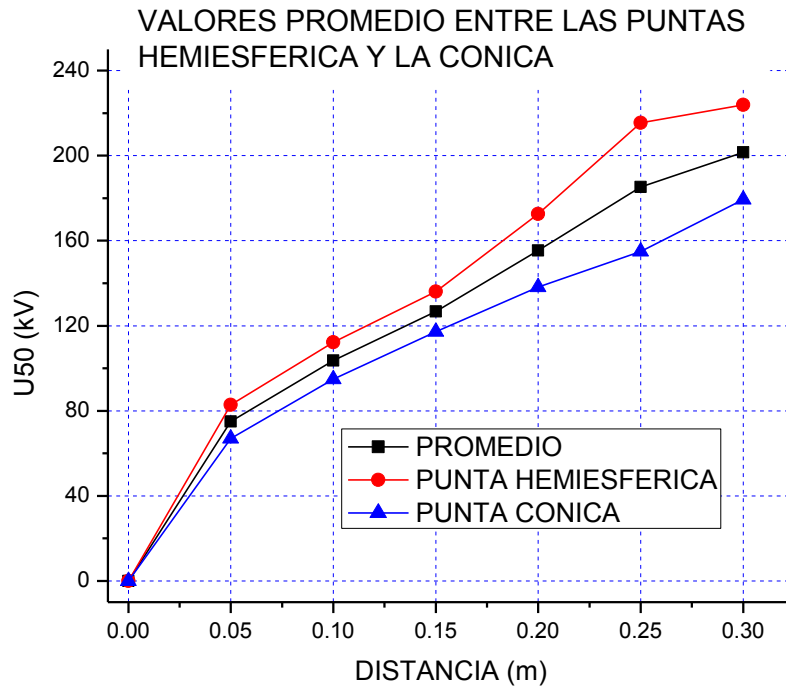


**Figura 4.11** - Resultado de pruebas de impulso por rayo en configuración punta-plano corregidos a los niveles estándares.

#### 4.5. Análisis de resultados.

Con los valores estándares de ambos perfiles se calcula el promedio que nos servirá para proponer nuestro modelo matemático y determinar la  $U_{50}$  al impulso por rayo para la configuración de electrodos punta-plano en distancias cortas, sin cadenas de aisladores, con polaridad positiva y en condiciones secas (Figura 4.12).

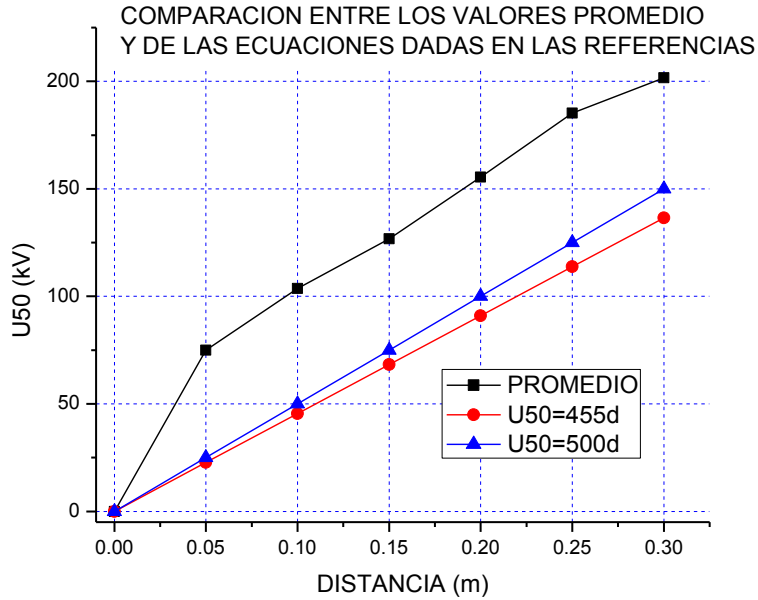
Nota: la línea en color negro muestra el valor promedio de ambos perfiles.



**Figura 4.12** - Promedio de los valores estándares de ambos perfiles.

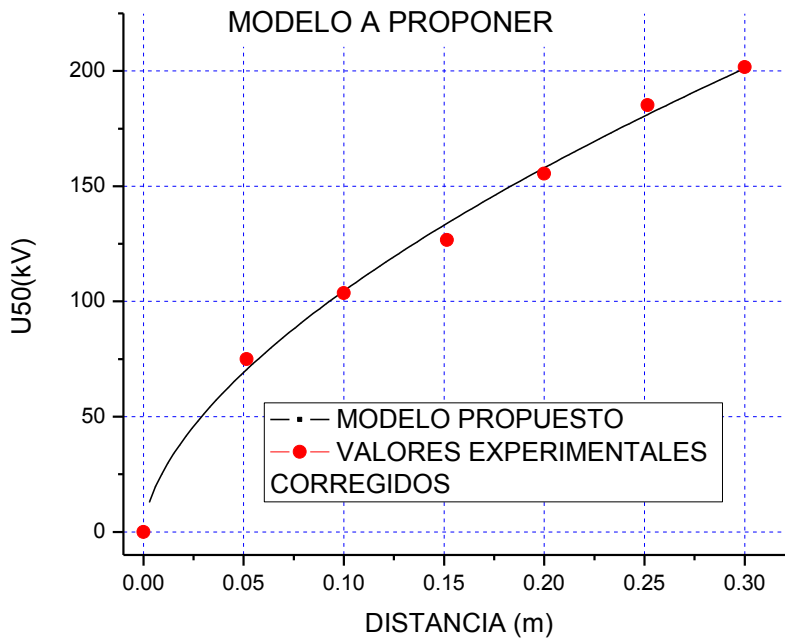
En la Figura 4.13 se compara nuestro promedio con las ecuaciones dadas en las referencias pero que son para distancias mayores (mayores de 1 m) y se puede ver que la  $U_{50}$  para nuestro promedio requiere una tensión mucho mayor para que exista una ruptura en el dieléctrico, por lo tanto existe diferencia entre los modelos de referencia y nuestro promedio corregido y esto se debe a que los modelos ya existentes fueron llevados a cabo con distancias mayores, mientras que nuestras pruebas se realizaron con distancias cortas (menores a 1 m).





**Figura 4.13** - Comparación entre los valores promedio y de las ecuaciones dadas en las referencias.

Con los valores experimentales corregidos se propone un nuevo modelo para la  $U_{50}$  al impulso por rayo en configuración punta-plano, sin cadenas de aisladores, en condiciones secas y con polaridad positiva (Figura 4.14).



**Figura 4.14** - Modelo propuesto.

Por lo tanto, el modelo matemático propuesto ajustando la curva mostrada en la Figura 4.14 con el paquete computacional Origin, arroja una constante de 411.92

kV que es el valor del campo eléctrico al cual inicia la descarga del streamer, el cual queda de la siguiente forma:

$$U_{50} = 411.92 d^{0.6} \quad (4.2)$$

donde:

$U_{50}$  = Tensión crítica de flameo (kV)

411.92 = Valor del campo eléctrico al inicio del streamer

$d$  = distancia entre electrodos (m)

#### 4.6. Utilidad del modelo matemático propuesto para la coordinación de aislamiento en una línea de distribución de 23 kV.

Ahora que se tiene el modelo matemático a proponer, se despeja del modelo y de otros definidos en referencias (formulas 1.1, 1.2 y 1.3) la variable  $d$  que representa la distancia.

$$U_{50} = 412d^{0.6} \quad (4.3)$$

$$\ln U_{50} = \ln(412 d^{0.6})$$

$$\frac{\ln U_{50}}{\ln 412^{0.6}} = d$$

$$d = \frac{U_{50}}{\text{Campo electrico del inicio del estreamer}}$$

A continuación, de la Tabla 2.3 se toma un valor de NBAI de 150 kV que es el mayor valor de tensión de aguante normalizado para impulso de rayo (kV) pico, de un valor de 23 kV de tensión nominal del sistema  $V_n$  (kV) eficaz y se utiliza la ecuación (2.9), para obtener la  $U_{50}$ .

- NBAI=150 [kV] (Especificación CFE L0000-06)

$$U_{50} = \frac{NBAI}{0.961} \quad (2.9)$$

Una vez que se tiene despejada la variable  $d$  y definido el valor de la  $U_{50}$ , se sustituyen los valores en la formula (2.9).

$$TCF \text{ ó } U_{50} = \frac{NBAI}{0.961} = \frac{150}{0.961} = 156 \text{ kV}$$

También se calcula la variable  $d$  (distancia) para las fórmulas 1.1, 1.2 y 1.3 que tienen un valor de campo eléctrico de 455, 500 y 480 kV, respectivamente.

$$d = \frac{U_{50}}{455} = \frac{156}{455} = 0.342 \text{ m}$$

$$d = \frac{U_{50}}{500} = \frac{156}{500} = 0.312 \text{ m}$$

$$d = \frac{U_{50}}{480} = \frac{156}{480} = 0.325 \text{ m}$$

Ahora se realiza el cálculo de la distancia con el modelo matemático propuesto, que tiene un valor del campo eléctrico de 412 kV.

$$d = \left(\frac{U_{50}}{412}\right)^{\frac{1}{0.6}} = \left(\frac{156}{412}\right)^{\frac{1}{0.6}} = 0.198 \text{ m}$$

**Tabla 4.7** - Distancias utilizando los modelos en referencia y el propuesto.

Modelos matemáticos	$U_{50} = 500 \text{ d}$	$U_{50} = 455 \text{ d}$	$U_{50} = 480 \text{ d}$	$U_{50} = 412 \text{ d}^{0.6}$
Distancia [m]	0.312	0.342	0.325	0.198

Como se observa la distancia resulta ser menor cuando se utiliza el modelo matemático propuesto.

#### **4.7. Comportamiento del campo eléctrico máximo promedio con el paquete computacional COMSOL.**

Empleando el paquete computacional COMSOL se obtienen los valores de campo eléctrico máximo promedio que existe del plano hasta la punta para los dos perfiles diferentes, la punta hemisférica y cónica, variando las distancias cada 0.05 m de 0 a 0.3 m.

En las Figuras 4.15 y 4.16 puede observarse el campo eléctrico máximo promedio en un perfil hemisférico para la distancia más grande de las pruebas, que fue de 0.3 m, así como su gráfica, que indica la magnitud desde la punta hasta el plano.

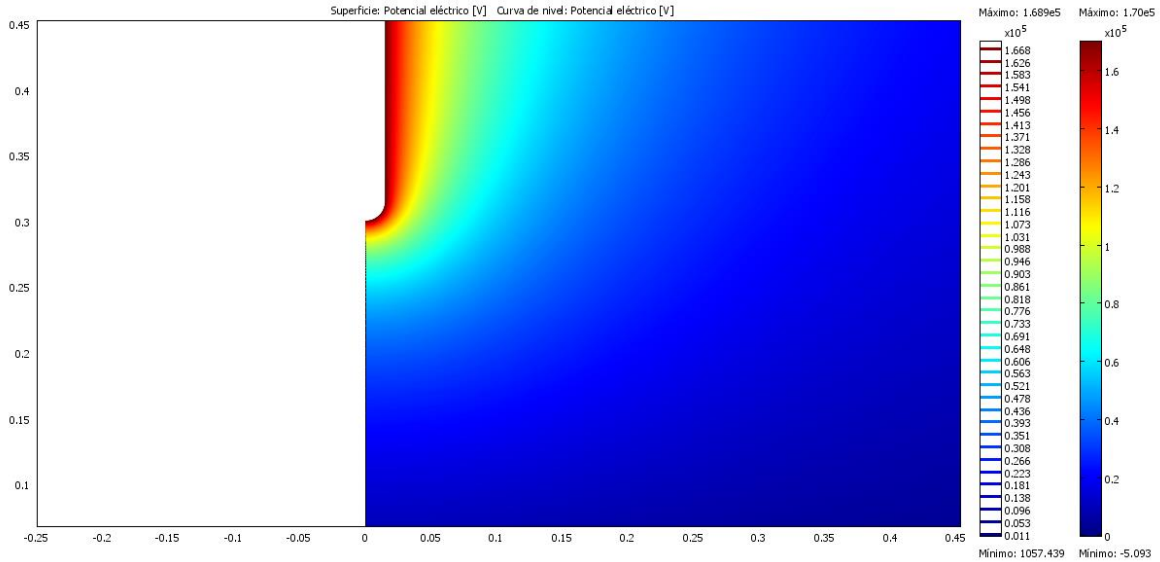


Figura 4.15 - Concentración del campo eléctrico máximo promedio para una punta hemisférica a una distancia de 0.3 m del plano.

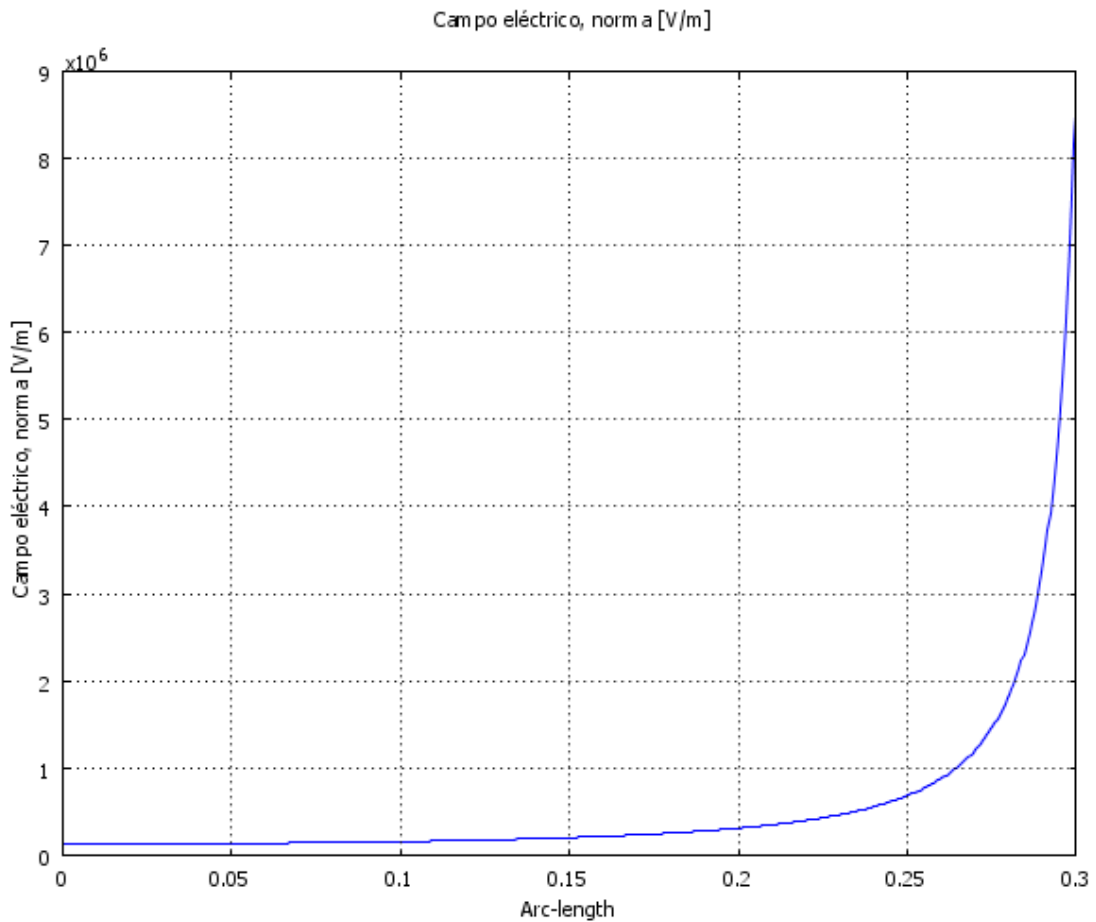


Figura 4.16 - Gráfica del valor del campo eléctrico máximo promedio para una punta hemisférica del plano hacia la punta.

**Tabla 4.8** - Valores de campo eléctrico máximo promedio para la punta hemisférica.

Distancia (cm)	V/m
5	4.50E+06
10	5.00E+06
15	5.20E+06
20	7.00E+06
25	8.50E+06
30	8.50E+06

Podemos ver el campo eléctrico máximo promedio para la distancia de 0.3 m así como su gráfica para una punta de perfil cónico.

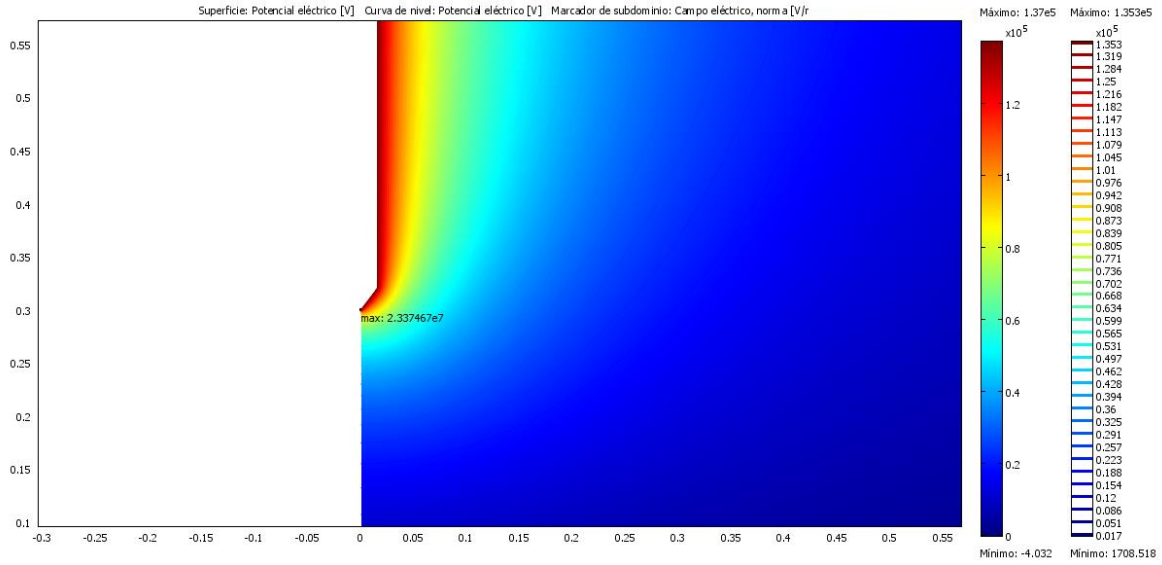


Figura 4.17 - Concentración del campo eléctrico máximo promedio para una punta cónica a una distancia de 0.3 m del plano.

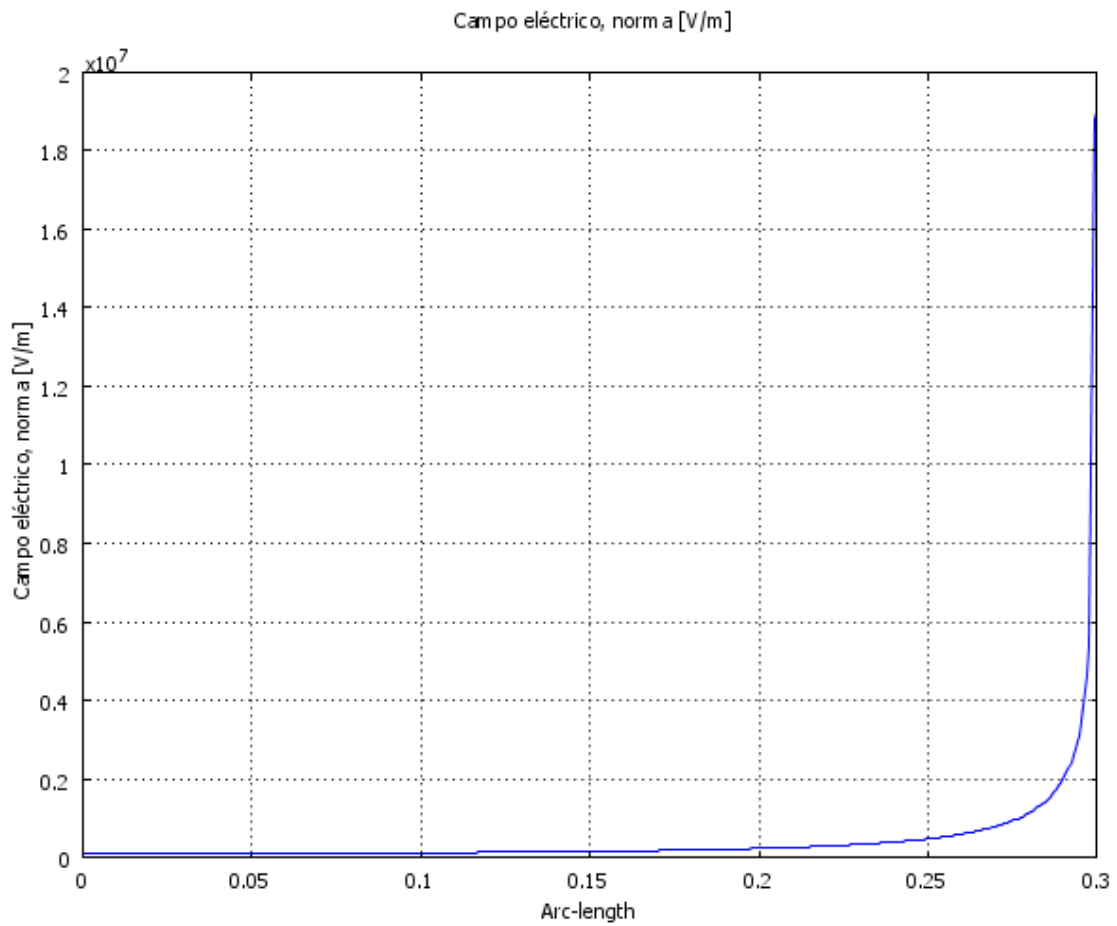


Figura 4.18 - Gráfica del valor del campo eléctrico máximo promedio para una punta cónica del plano hacia la punta.

**Tabla 4.9** - Valores de campo eléctrico máximo promedio para la punta cónica.

Distancia (cm)	V/m
5	1.25E+07
10	1.29E+07
15	1.36E+07
20	1.48E+07
25	1.70E+07
30	1.90E+07

#### 4.8. Corrección del Campo Eléctrico Máximo Promedio.

Con los valores del campo eléctrico máximo promedio obtenidos de la Tabla 4.8 y 4.9, se realiza la corrección atmosférica al nivel de la Ciudad de México con la ecuación (2.13):

$$E_s = \delta E_{s1} \quad (2.13)$$

Se utiliza el primer valor del campo eléctrico máximo promedio en la punta cónica para la distancia de 0.05 m, y se utiliza la densidad del aire que existe en la ciudad de México que es de 0.76.

$$E_s = (0.76)(12500 \text{ Kv/m})$$

$$E_s = 9500 \text{ Kv/m}$$

Se realiza el mismo procedimiento para todas las distancias y ambos perfiles. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.10.

**Tabla 4.10** - Valores de campo eléctrico máximo promedio en la punta a nivel de la Ciudad de México.

Distancia (m)	COMSOL CORREGIDO	
	Cónico (kV/m)	Hemisférico (kV/m)
0.05	9500	3420
0.1	9804	3800
0.15	10336	3952
0.2	11248	5320
0.25	12920	6460
0.3	14440	6460

A partir de los valores de la Tabla 4.10 se obtiene una relación utilizando la ecuación (3.2). Retomando lo visto en el punto 3.3 respecto a la uniformidad del

campo eléctrico que se refiere a la uniformidad (homogeneidad) del campo eléctrico que viene definida por la siguiente relación

$$\eta = \frac{E_m}{E_{max}} \quad (3.2)$$

Cuando  $\eta$  toma el valor unidad significa que el campo es homogéneo  $E_{max} = E_m$  y cuando está más cerca de cero el campo será divergente (no homogéneo); esto se debe a que el diámetro de la punta de los perfiles es muy pequeño. Los campos no homogéneos son los más habituales en la mayor parte de las instalaciones de alta tensión. En estos casos el mecanismo streamer es el que rige las descargas (presión atmosférica y distancias libres de aire superior a algunos centímetros).

$$\eta = \frac{500 \frac{kV}{m}}{9500 \frac{kV}{m}}$$

$$\eta = 0.052631579$$

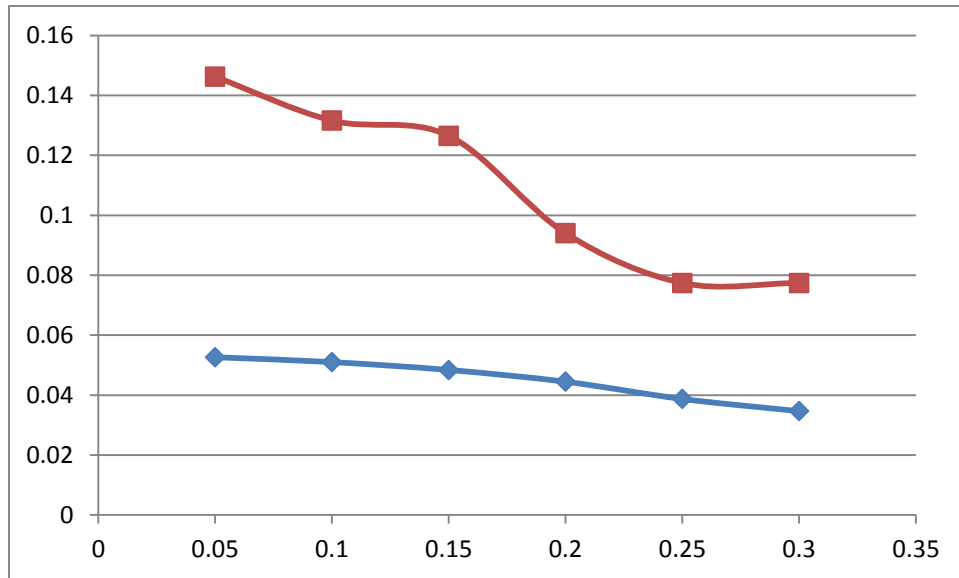
Se utiliza la misma relación para todas las distancias de ambas configuraciones dando como resultado los valores de la Tabla 4.11.

**Tabla 4.11** - Factor de uniformidad del campo eléctrico  $\eta$ .

Distancia (m)	Streamer(500)/COMSOL(Corregido)	
	Cónico	Hemisférico
0.05	0.052631579	0.14619883
0.1	0.050999592	0.131578947
0.15	0.048374613	0.126518219
0.2	0.044452347	0.093984962
0.25	0.03869969	0.077399381
0.3	0.034626039	0.077399381

Con estos valores se obtiene la gráfica de la Figura 4.19, en la cual se muestra el perfil hemisférico en color rojo y el perfil cónico en color azul.





**Figura 4.19** - Factor de uniformidad del campo eléctrico para el perfil hemisférico y cónico.

Se puede ver en la Figura. 4.19 que para el perfil cónico el factor de uniformidad del campo eléctrico decrece menos a medida que se varía la distancia que para el perfil hemisférico, aunque se aprecia que los valores de uniformidad del campo eléctrico para el perfil cónico son más bajos que para el perfil hemisférico.

Se puede comprobar que  $\eta$ , es decir la uniformidad del campo eléctrico para ambos perfiles, arroja resultados bajos pero más bajos aun para el perfil cónico; esto se debe a los pequeños valores de diámetro de los perfiles. Entonces podemos comprobar la presencia de campos fuertemente inhomogeneos o divergentes en la parte experimental de este proyecto significando que se cumple la condición de reducción de la tensión de flameo,  $U_c$  que se producirá con campos divergentes debido a los bajos valores de uniformidad en el campo eléctrico ( $\eta$ ) y que la máxima tensión soportada en el aislamiento se logra cuando el campo es homogéneo.

## Conclusiones.

Se obtuvo la  $U_{50}$  aplicando el método Up and Down con impulsos de polaridad positiva, sin cadenas de aisladores en condiciones secas al nivel de la ciudad de México con una forma de onda normalizada  $1.2/50 \mu s$ .

Con el paquete computacional COMSOL, se obtuvo el campo eléctrico máximo promedio el cual se corrigió al nivel de la ciudad de México.

Se compararon los valores de las pruebas para los dos perfiles y se aprecia que existe una variación de  $U_{50}$  entre ambos perfiles ya que se presenta una mayor concentración de campo eléctrico en el perfil cónico, por el efecto punta o menor superficie que tiene este perfil, que facilita la ruptura en el dieléctrico.

Se observa que en los valores experimentales (Figura 4.10) y en los valores estándar (Figura 4.11) existe una diferencia para la tensión de ruptura la cual es mayor para altitudes como en la Ciudad de México; esto se debe a que la densidad relativa del aire decrece a mayor altitud sobre el nivel del mar.

Se comparó nuestro promedio corregido a niveles estándar con las ecuaciones que se tienen de referencia, se aprecia que la  $U_{50}$  para nuestro promedio requiere una tensión mayor (lo cual es positivo para diseñar sistemas aislantes) para que exista una ruptura en el dieléctrico. Por lo tanto, existe una diferencia entre los modelos existentes con nuestro promedio corregido y esto se debe a que los modelos existentes fueron llevados a cabo para distancias superiores a 1 m, mientras que nuestras pruebas se realizaron en distancias cortas, menores a 1 m.

En la realización de este proyecto se propone un nuevo modelo para la coordinación de aislamiento en distancias cortas para líneas de 23 kV y replantear el uso de las ecuaciones que se tienen en referencia ya que son empleadas en diseños para equipos de 85 o 230 kV.

El campo eléctrico máximo promedio que se obtuvo en la Tabla 4.8 y 4.9 es muy diferente al campo eléctrico en el que comienza a desarrollarse el streamer (es el inicio de la descarga eléctrica en forma de serpiente) el cual se puede ver en las ecuaciones 1.1 y 1.2. Sin embargo, estos valores nos sirvieron para comprobar nuestro factor de uniformidad del campo eléctrico.

Se demuestra que nuestras pruebas fueron en un campo eléctrico no homogéneo porque obtuvimos como resultado un factor de uniformidad del campo eléctrico que se puede ver en la Tabla 4.11 y esto fue posible gracias a la ecuación con la cual corregimos los valores obtenidos por el paquete computacional COMSOL

## Bibliografía.

- [1] MARTÍNEZ VELASCO Juan Antonio, "Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión", Mc Graw-Hill, Capítulos 1-3.
- [2] ENRÍQUEZ HARPER Gilberto, "Técnica de las altas tensiones", Volumen I, Noriega LIMUSA, segunda pre edición 1990. pág. 269.
- [3] Especificación CFE L0000-06, Coordinación de aislamiento, Febrero 1980. Pág. 12-14.
- [4] RAKOSHDAS BEGAMUDRE, "Extra High Voltage AC Transmission Engineering" Third Edition, NEW AGE INTERNATIONAL PUBLISHERS, Page. 257.
- [5] SACCHI L.N Jorge., RIFALDI Alfredo,"TECNICA DE LA ALTA TENSION", Pág. 157-160.
- [6] ENRÍQUEZ HARPER Gilberto, "Técnica de las altas tensiones", Volumen I, Noriega LIMUSA, primera edición 1974, pág.104, 105, 286-297.
- [7] FAROUK A.M RIZK "Critical switching Impulse Strength of Long Air Gaps: Modelling of air Density Effects", IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 7, n° 3, July 1992. Page 1509.
- [8] E. KUFFEL, W.S. Zaengl, J. Kuffel, "High Voltage Engineering Fundamentals", testing procedures and insulation coordination, page. 460.
- [9] L. Paris, R. Cortina, "Switching and Lightning impulse discharge characteristics of large air gaps and long insulator strings", IEEE. Trans on PAS Vol. 87, n° 4, April 1968, Page. 952 - 954.
- [10] "Guidelines for the evaluation of the Dielectric Strength of External Insulation", CIGRE-72, Working Group 07 of the Study Committee 33.

## Anexo A.

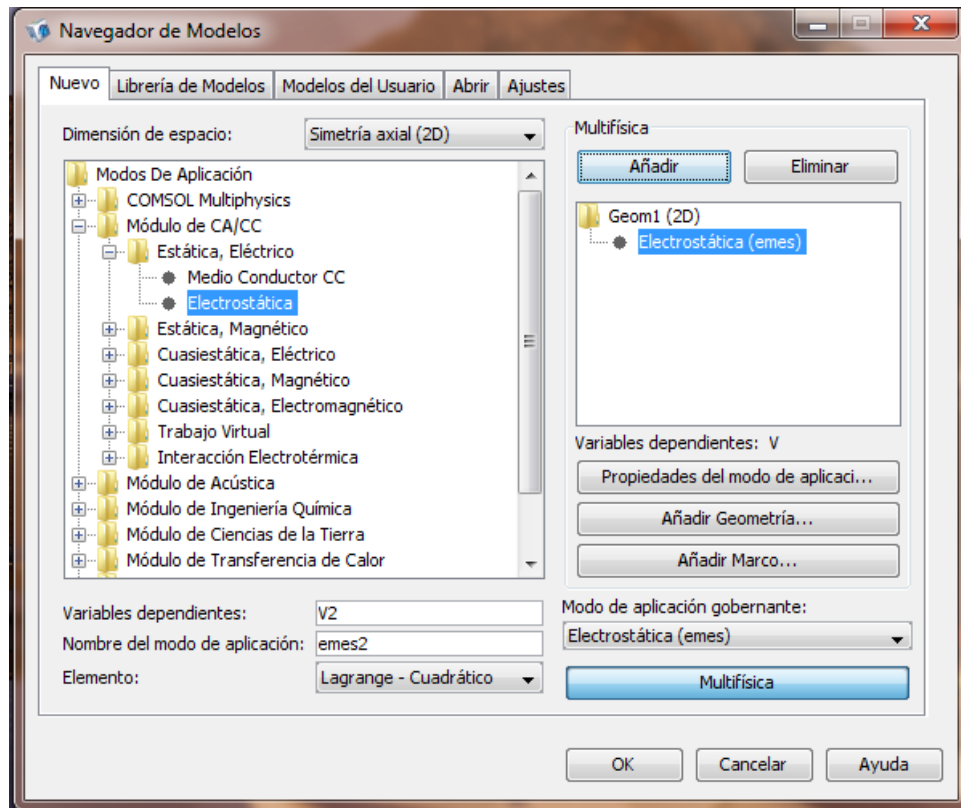
### I. Procedimiento de simulación empleando el paquete computacional COMSOL.

El paquete computacional COMSOL es un Software CAE para modelado 3D, análisis y simulación de fenómenos físicos en ingeniería como problemas con fluidos, estructurales, térmicos, electromecánicos entre otros, que permite definir la geometría 3D especificando el mesh o mallado, cargas y la visualización previa del análisis para luego ejecutar el postproceso y ver reportes finales.

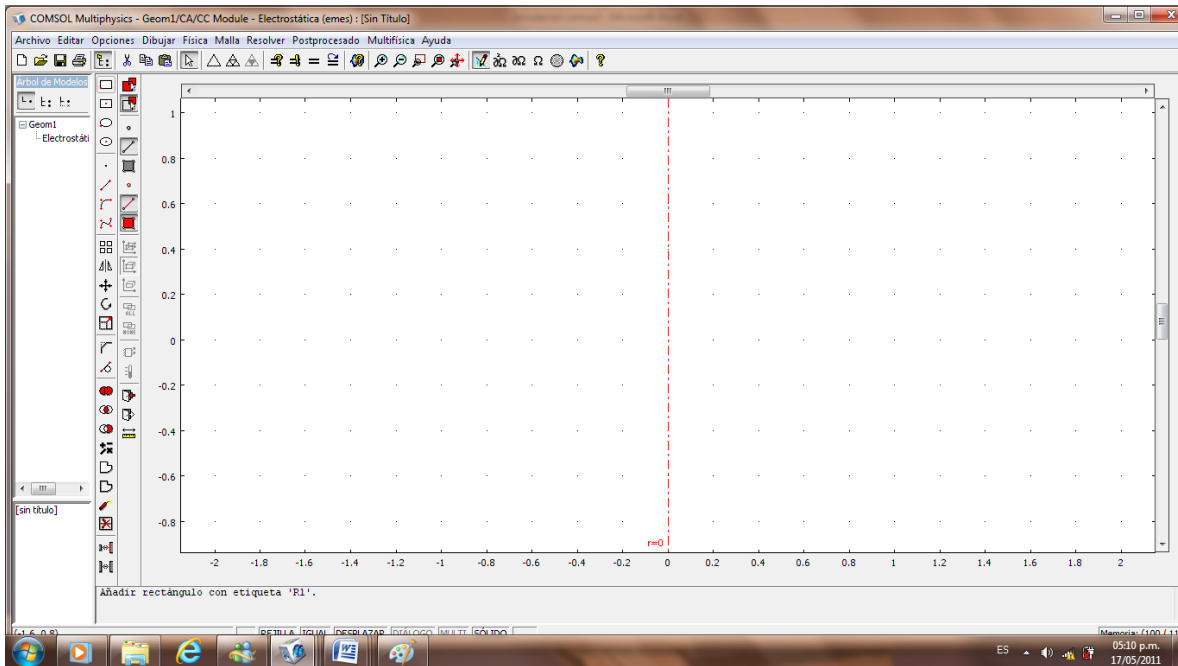
Una vez instalado el programa en un ordenador, el usuario debe dar doble "clic" sobre el icono de Comsol. Para iniciar la simulación de campo eléctrico se deben seleccionar las siguientes opciones:

- Dimensión de espacio: Simetría axial (2D)
- Módulo de CA/CC, Estática/ Eléctrico, Electroestática
- "Multifísica"
- "Añadir"

Presione "ok".



Una vez realizadas estas operaciones se deberá mostrar la siguiente ventana donde se dibuja la geometría de la configuración electródica.



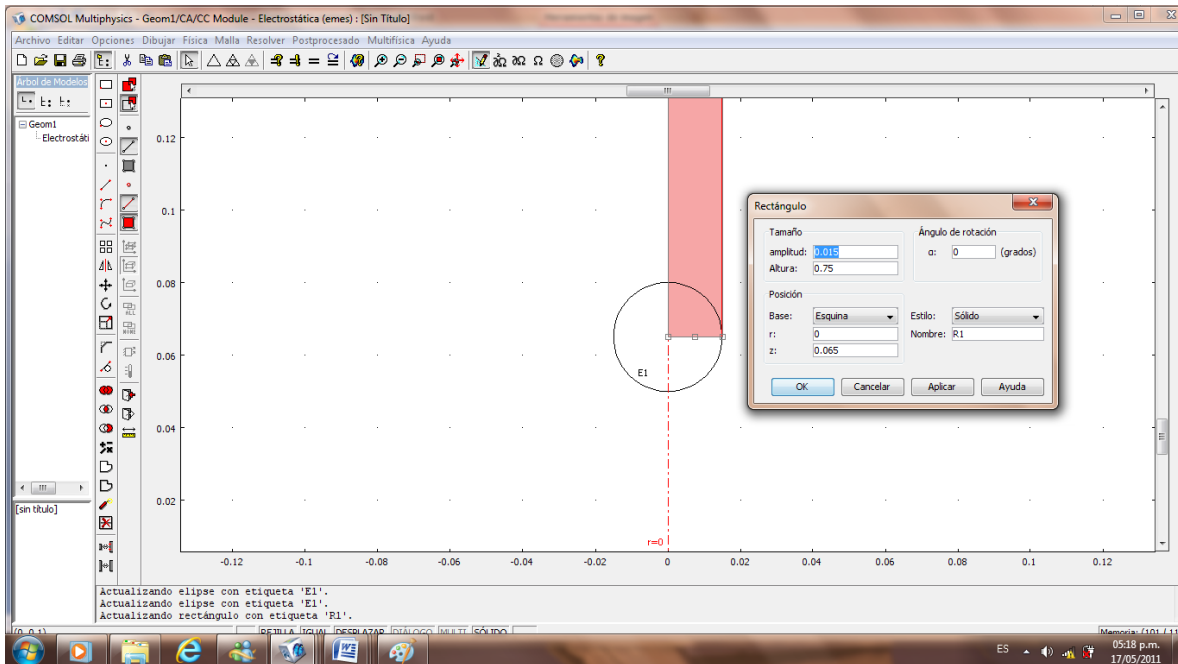
Se selecciona un rectángulo y se coloca en el centro del dibujo.

Se le da doble clic izquierdo para indicar los parámetros de la barra los cuales son:  
Tamaño

Aamplitud (la mitad del ancho de la barra): 0.015,

Altura (Longitud de la barra): 0.75,

z (Que es el eje y):0.065

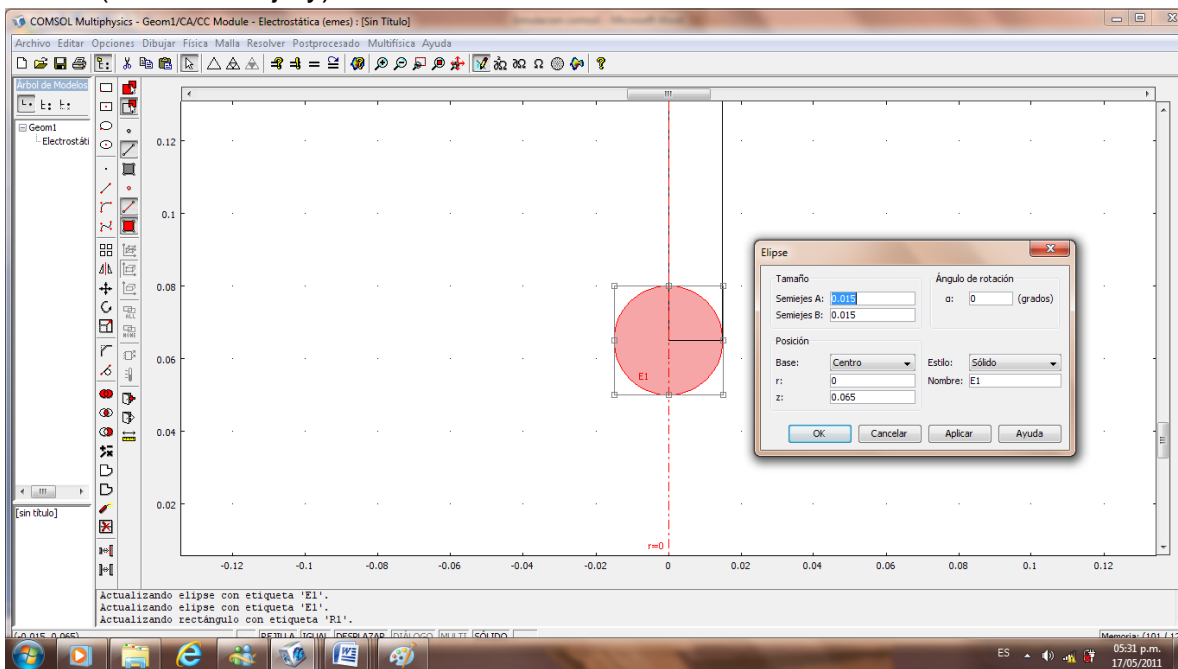


Se realiza el mismo procedimiento para un círculo.

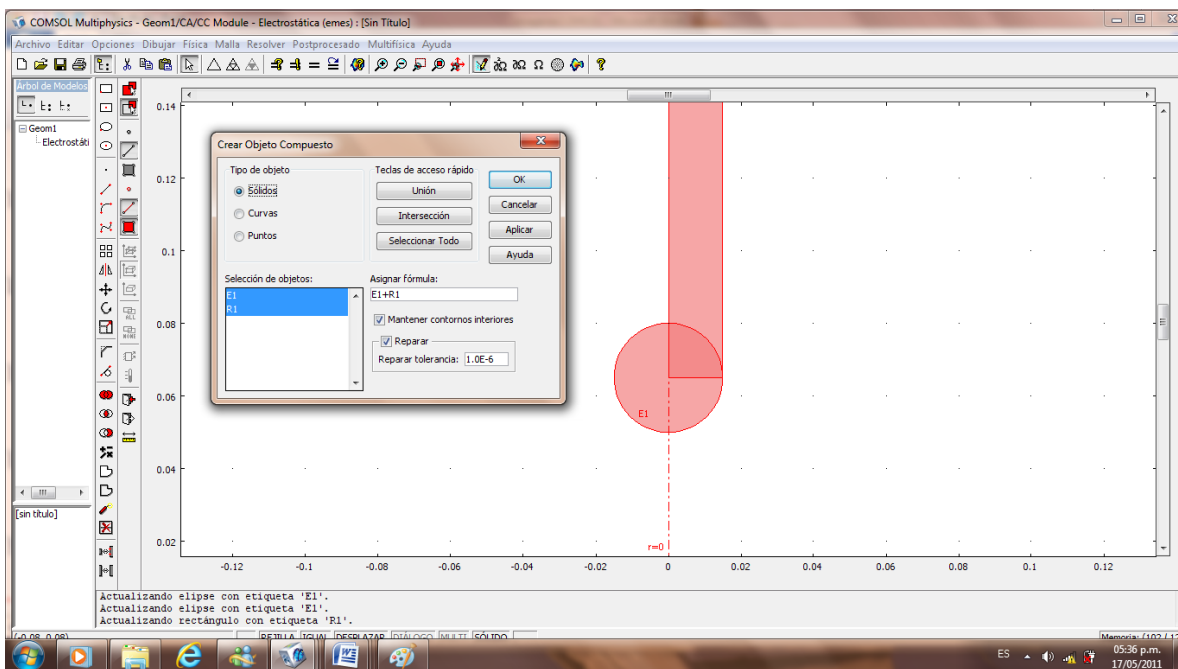
Tamaño:

Semiejes A, B (radio de la punta hemiesferica): 0.015

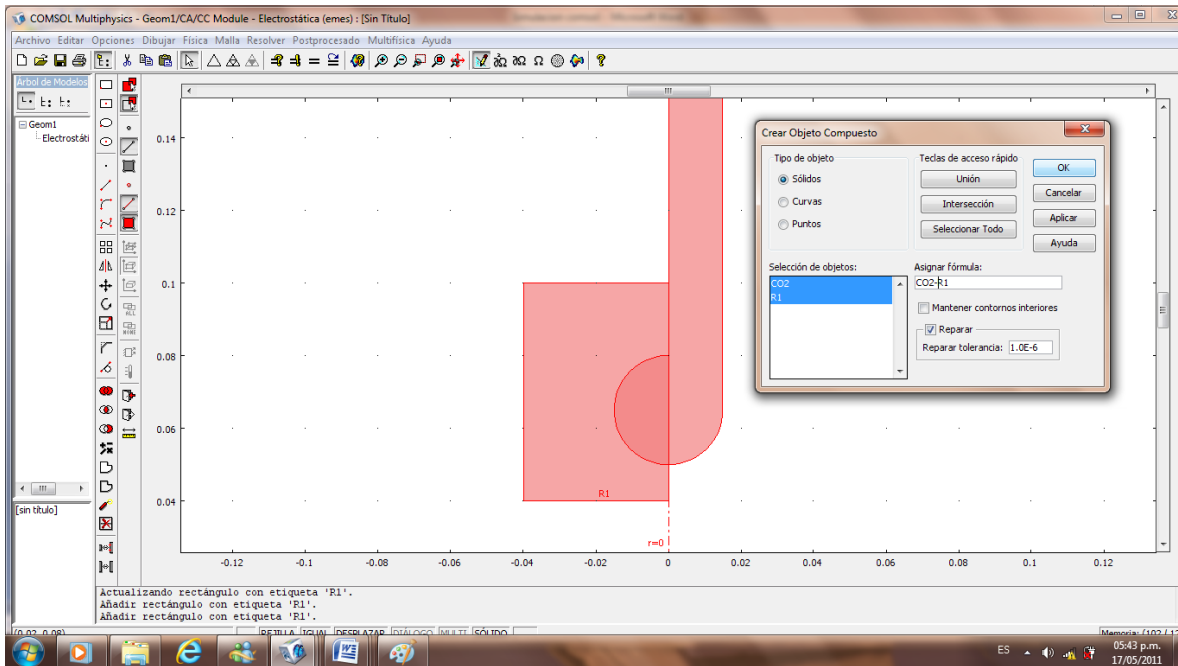
z (Que es el eje y):0.065



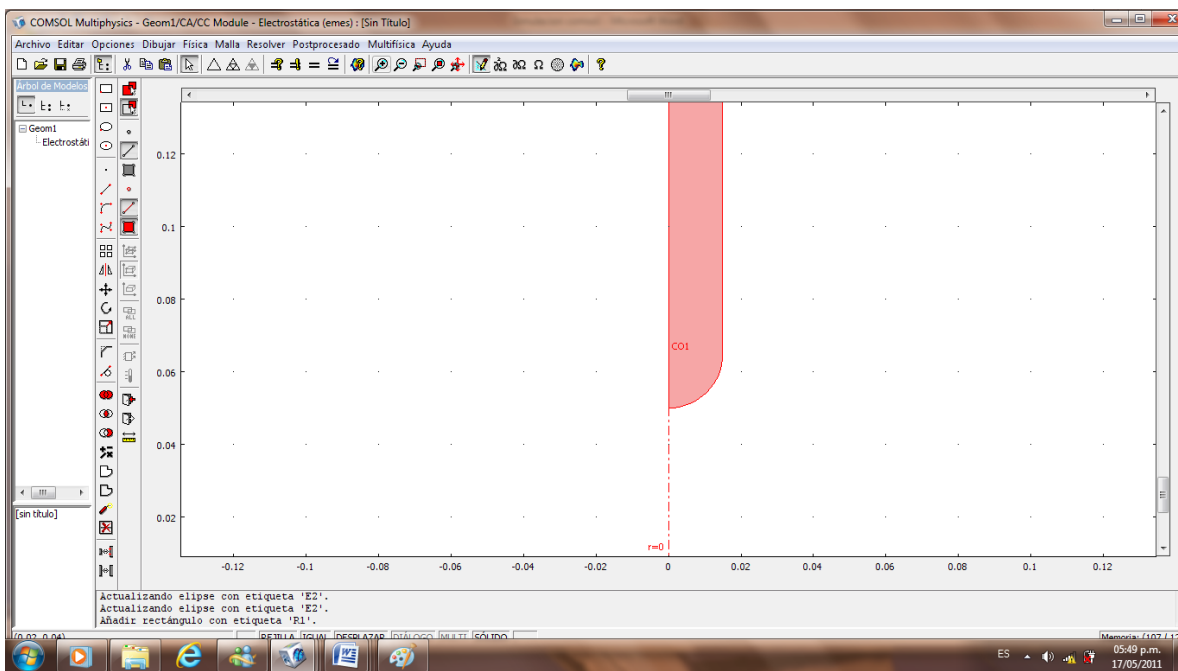
Se suman las 2 figuras como se ve en la siguiente ventana y desmarcamos la casilla de “Mantener contornos internos” para tener una sola figura sin divisiones.



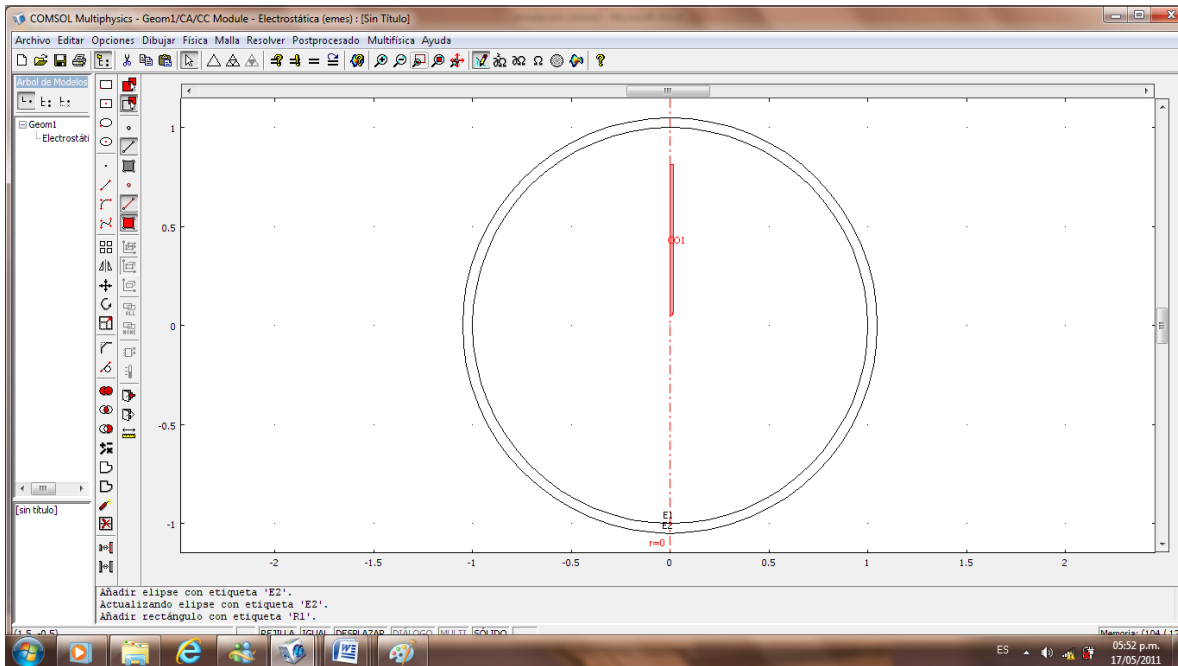
Se deberá dibujar un rectángulo del lado izquierdo para poder eliminar la parte que no se utilizará porque es una simetría axial y sólo se necesita la mitad.



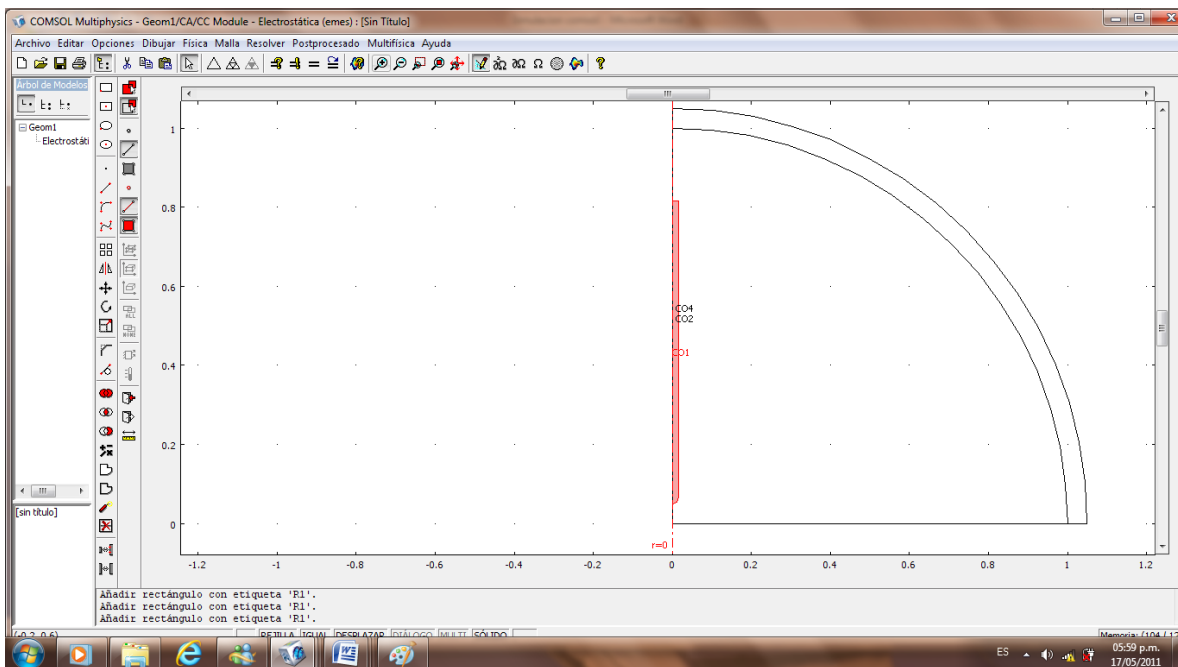
Aquí podemos ver cómo debe de quedar nuestra punta hemisférica.



Se deberán dibujar dos circunferencias más: la primera nos indicará el campo eléctrico que existe en 1 m de longitud alrededor de la punta y la segunda circunferencia simulara una aérea infinita.

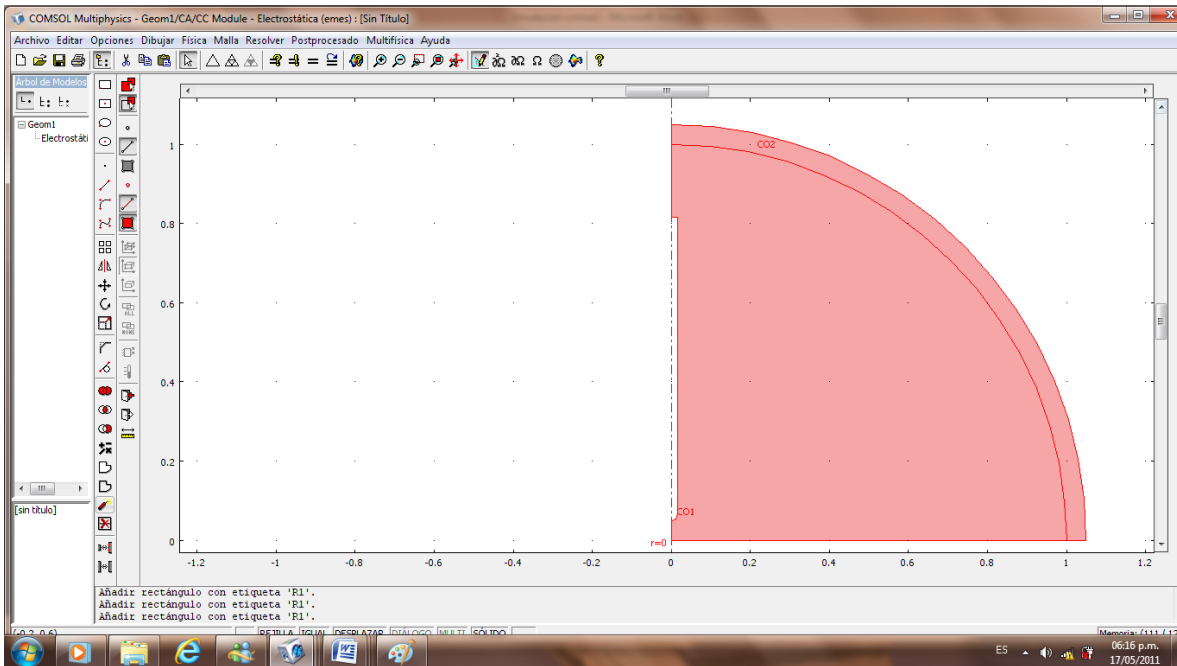


Eliminar 3/4 partes de las circunferencias y se verá nuestro dibujo de la siguiente manera.

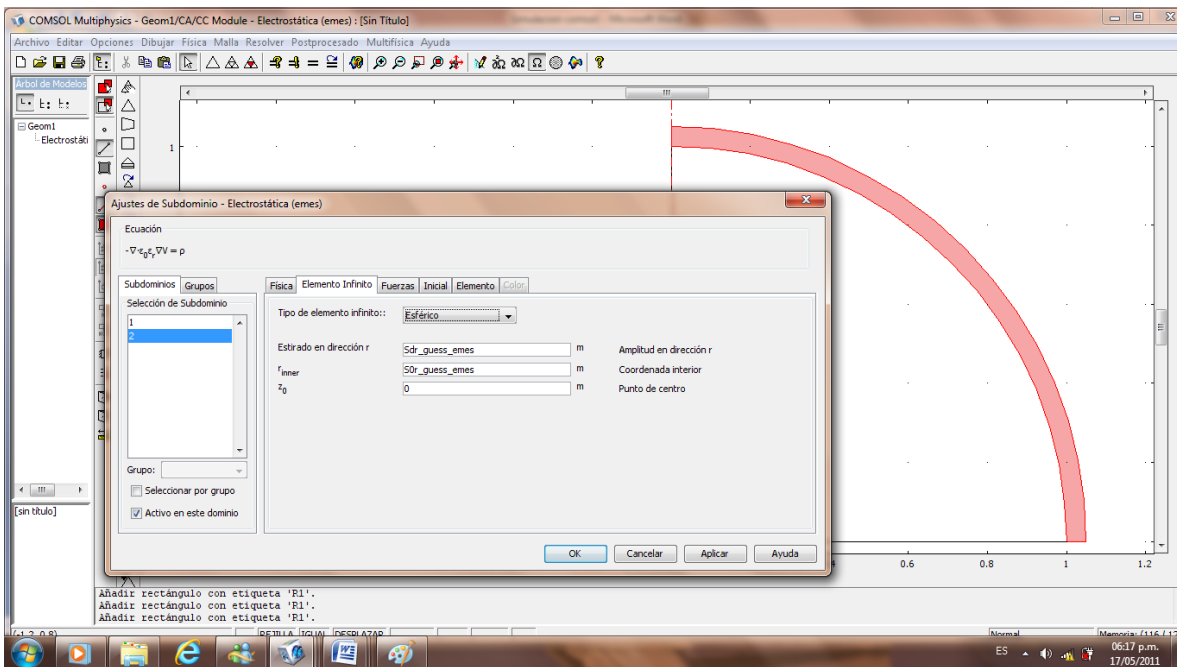


A continuación se presiona ctrl+a para seleccionar toda la configuración y escoges la opción de forzar a sólido para obtener una sola figura, después se debe seleccionar el ícono de explotar (dinamita), seleccionas la barra y la eliminas (Supr). Se puede ver el resultado de la configuración en la siguiente imagen.

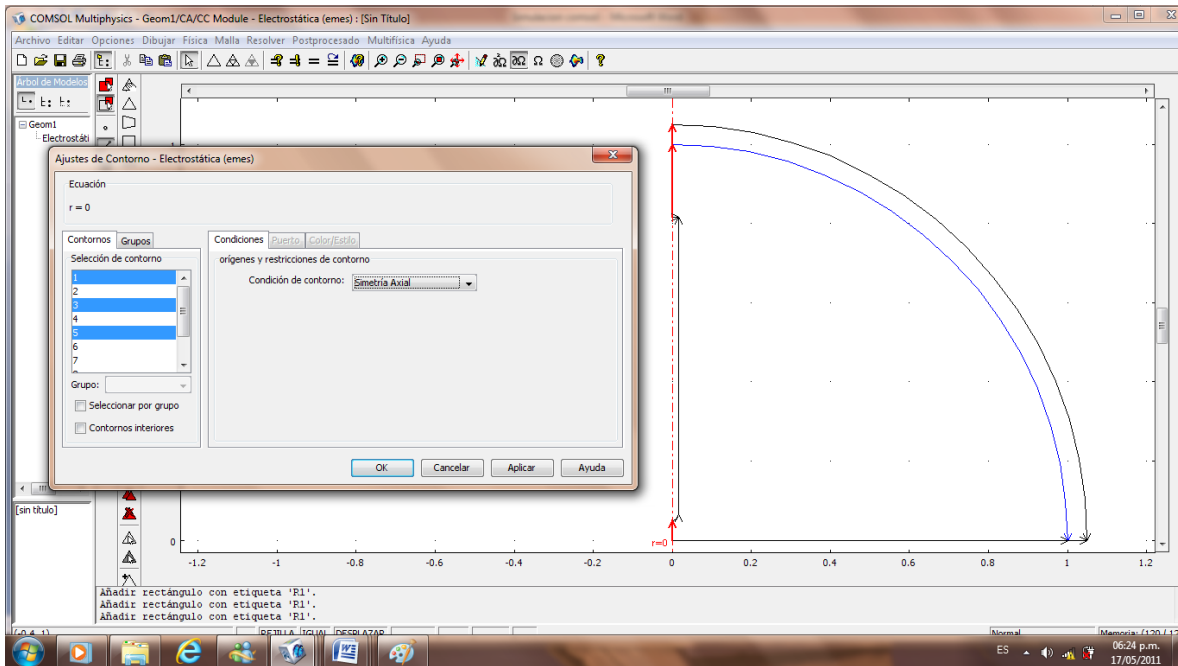




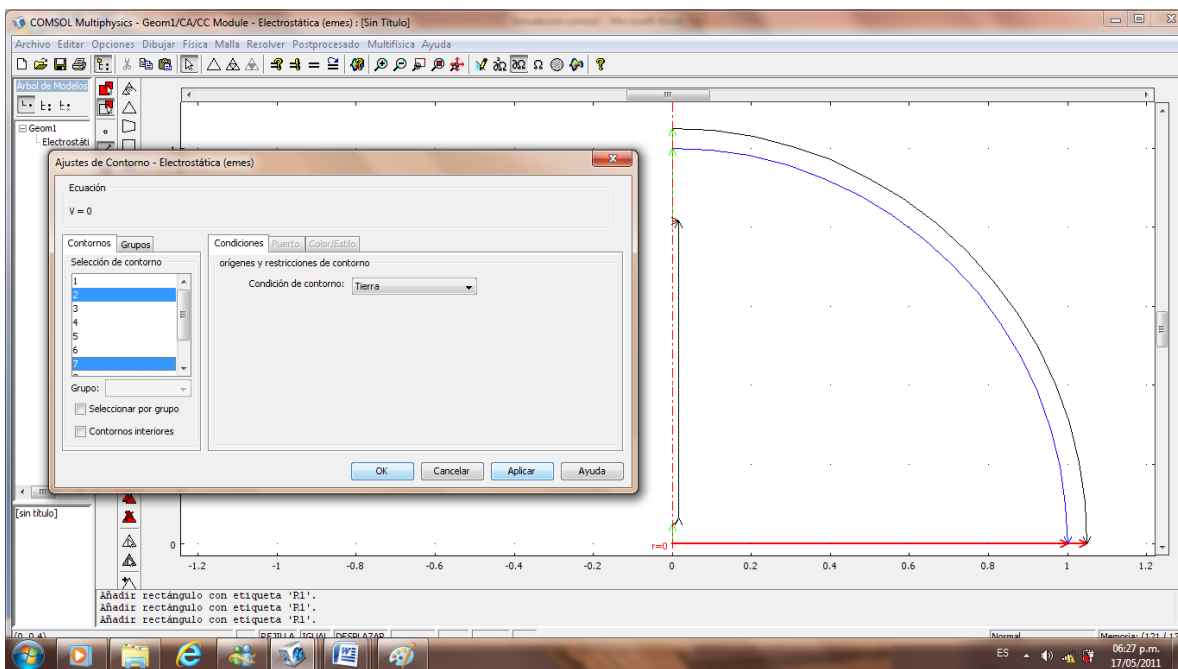
Se presiona F8 para poner el subdominio de infinito a la figura seleccionada (2) como se indica a continuación: Tipo de elemento infinito=Esférico.



Oprimes F7 para poner los ajustes de contorno: En 1, 3 y 5 su condición de contorno es: Simetría Axial (las líneas de color rojo nos indica los contornos seleccionados).

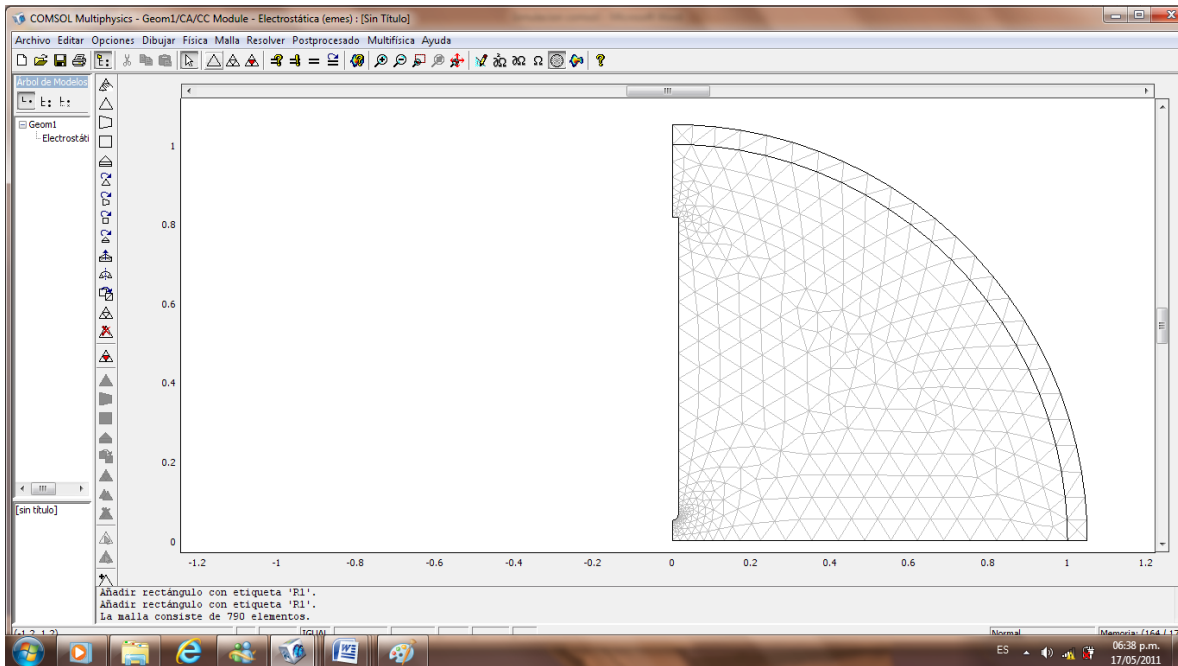


La condición de los contornos 2 y 7 se ponen a Tierra.

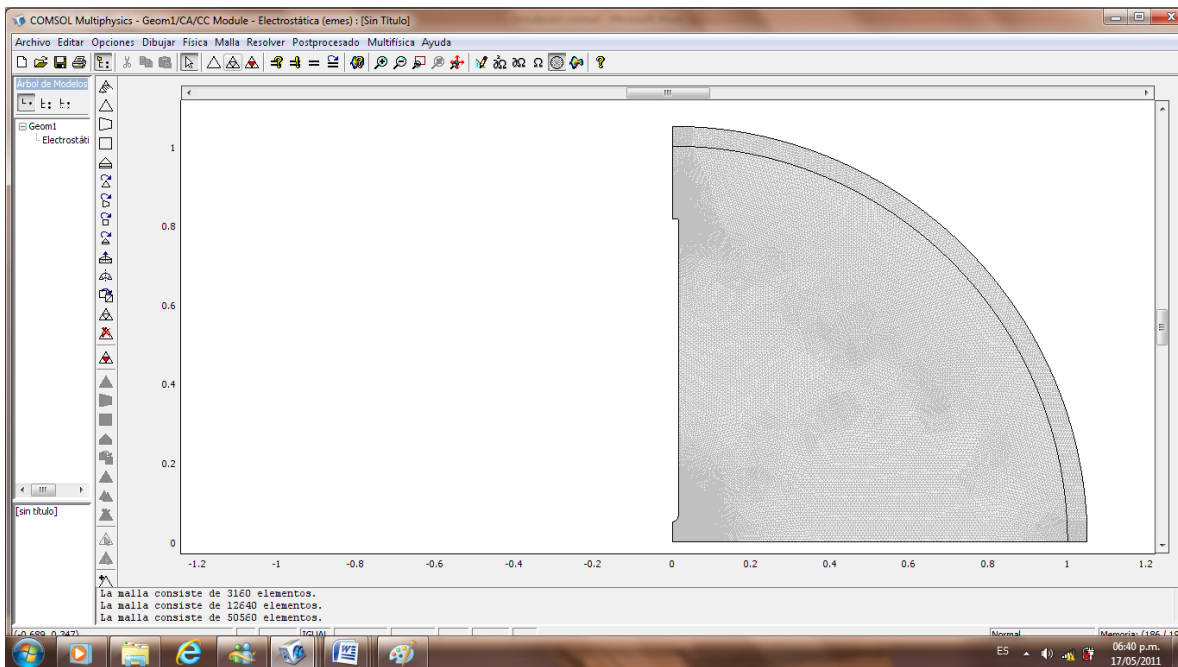


La condición para los contornos 4, 6 y 7 serán indicados en potencial eléctrico de 63 kV que es la tensión de ruptura que se obtuvo experimentalmente ( $U_{50}$ ) para una distancia de 0.05 m.

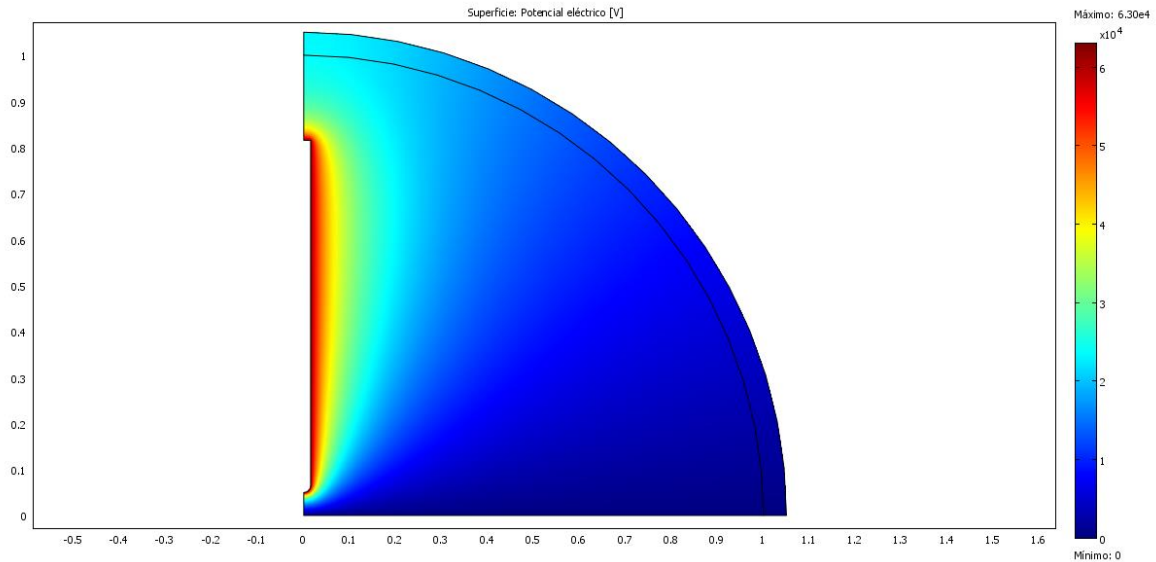




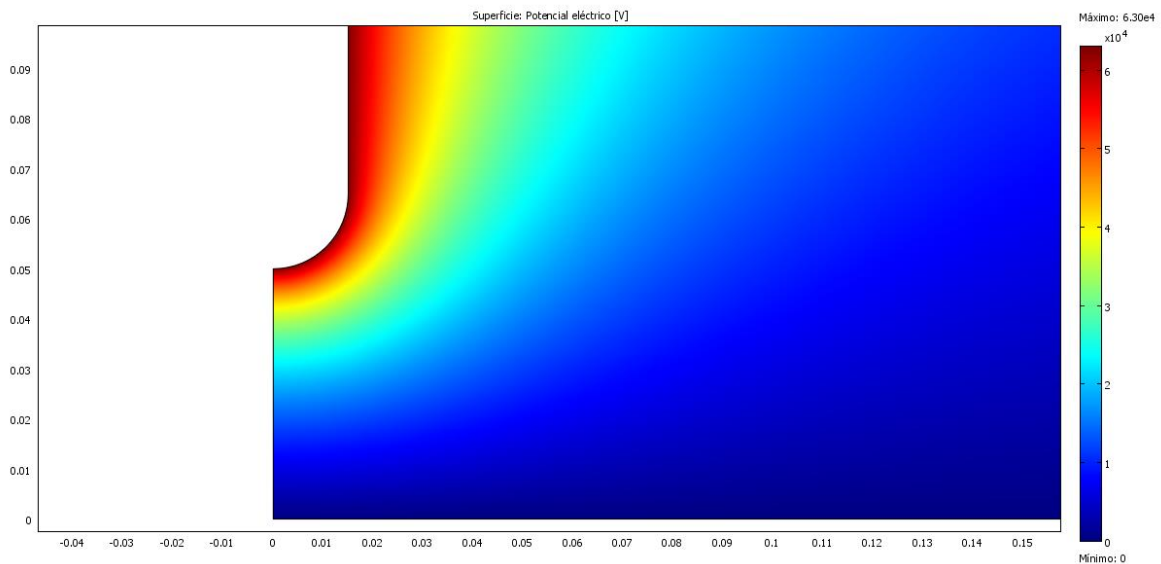
Seleccionas el ícono de "refinar malla" para obtener una mejor apreciación del campo eléctrico (en nuestro caso lo seleccionamos 3 veces).



Ahora se resuelve el sistema, presionando el icono de "reanudar".



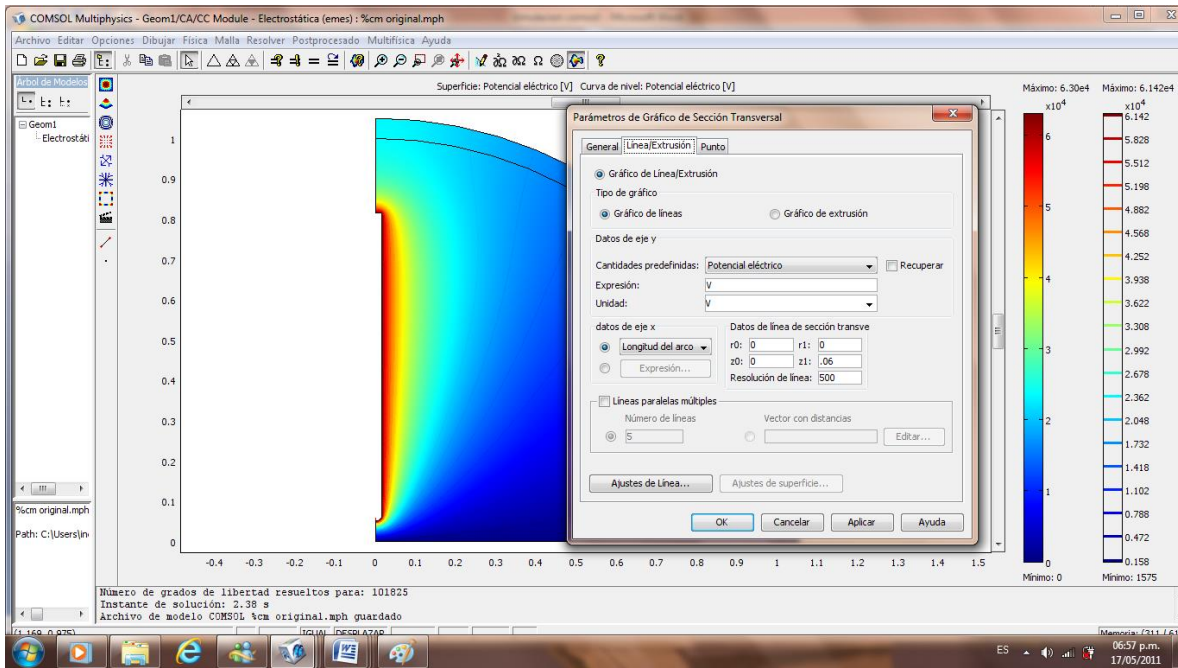
Aquí se puede ver claramente la concentración del campo eléctrico en la punta hemisférica.



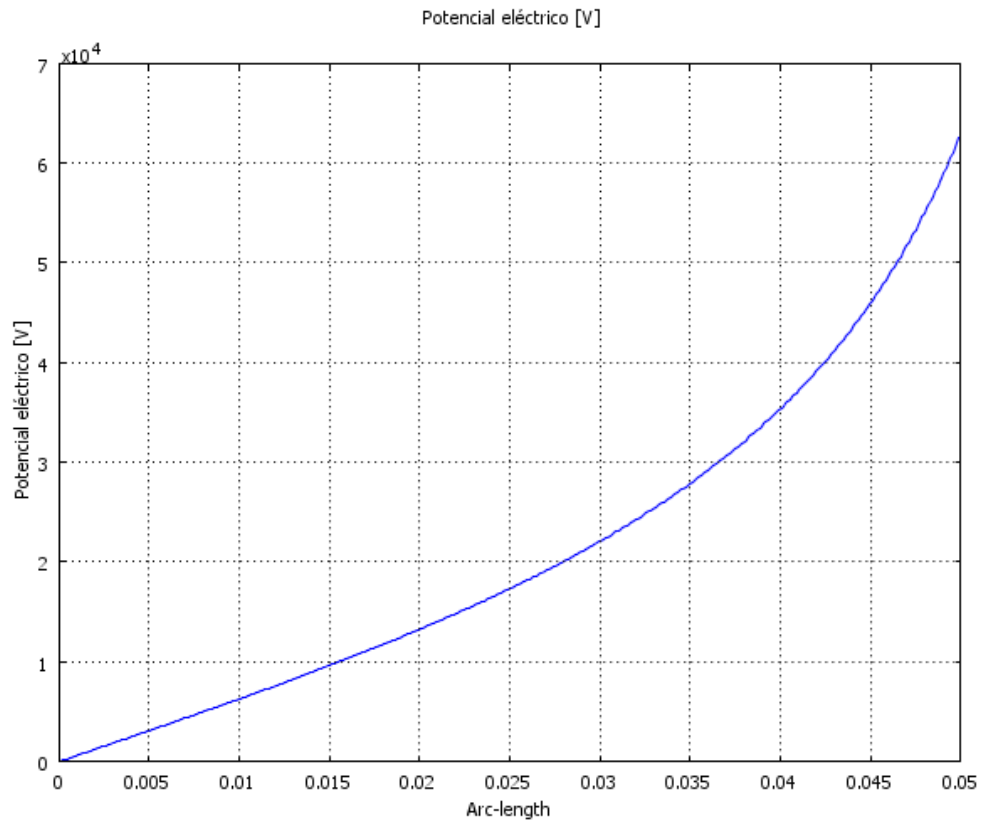
Para obtener la gráfica de Potencial eléctrico vs distancia te vas a la opción de “Pos procesado” y después a la de “Parámetros de Grafico de Sección Transversal” y se agregan los siguientes datos:

Cantidades predefinidas: Potencial eléctrico

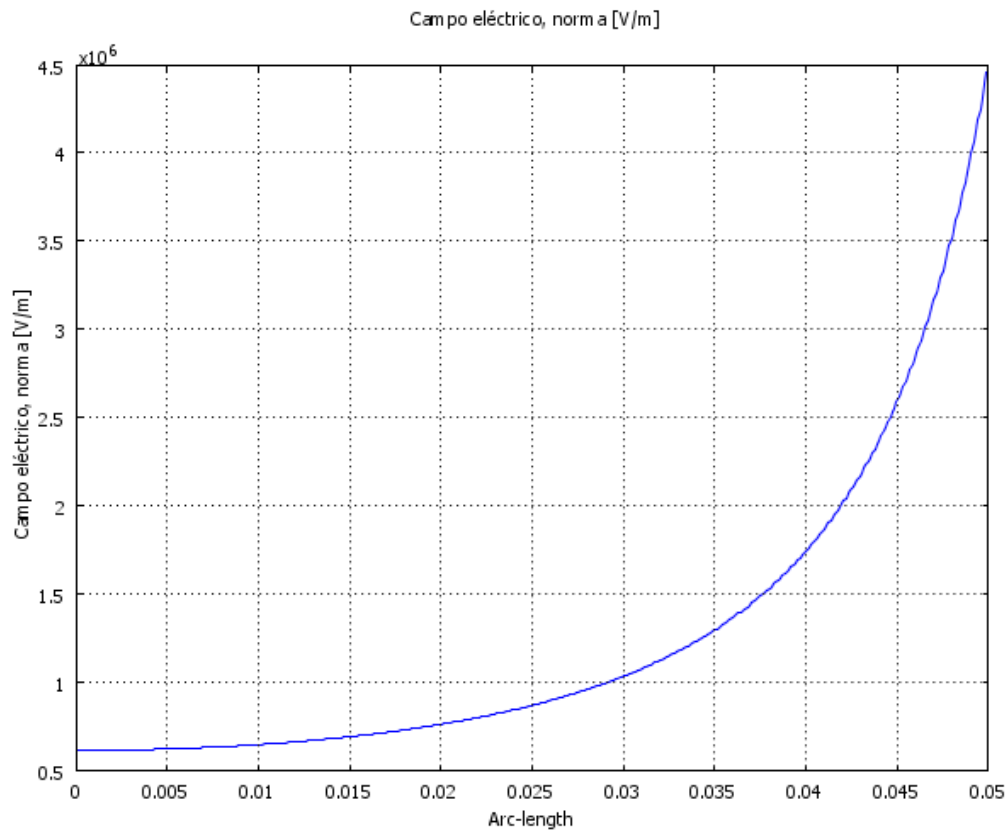
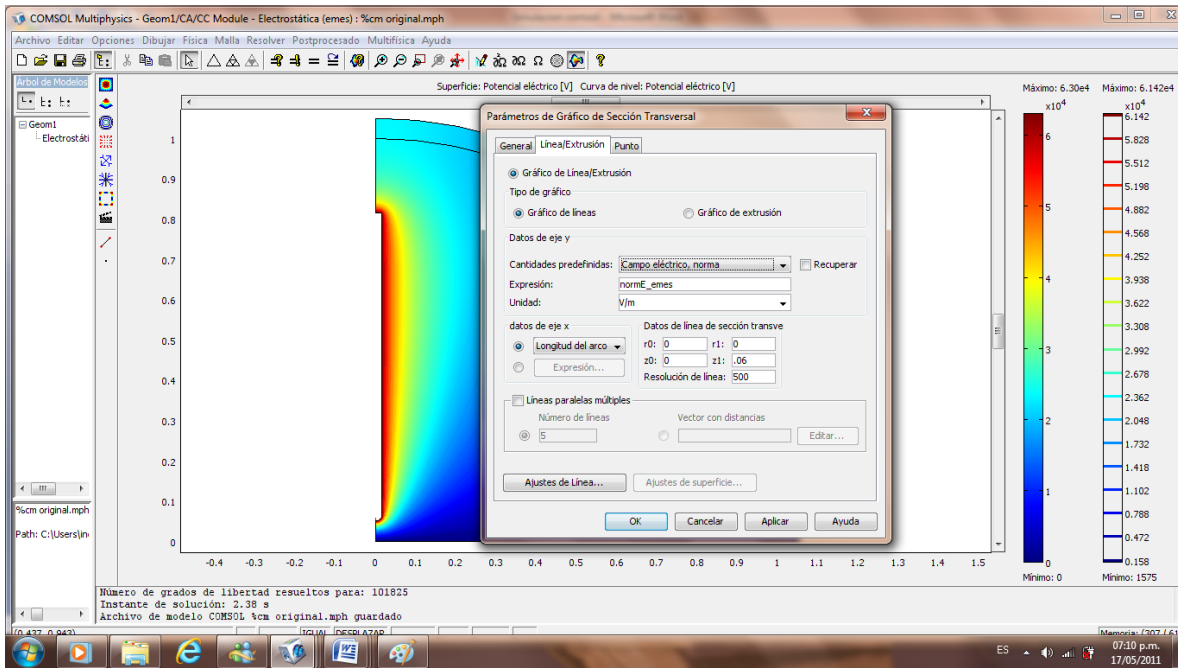
Datos de línea de sección transversal:  $z_1=0.06$ , Resolución de línea= 500



Se obtiene la siguiente gráfica mostrando el potencial eléctrico que existe en la punta hemisférica.



Se realiza el mismo procedimiento para obtener la gráfica del campo eléctrico vs distancia, lo único que se cambia es en la opción de “Cantidades predefinidas”: Campo eléctrico/norma



## **Glosario.**

**Tensión crítica de flameo o  $U_{50}$ .**- Es un valor promedio al cual ocurre el flameo en un aislamiento en el 50% de los impulsos aplicados.

**NBAI.**- Se define como el nivel de tensión que el aislamiento de un equipo debe de soportar durante un procedimiento de prueba.

**Streamer.**- Es el inicio de la descarga eléctrica en forma de serpentín, formando un canal ionizado entre 2 electrodos.

**Contorneo.**- Descarga disruptiva del aislamiento que tiene lugar cuando la avalancha electrónica consigue atravesar el espacio comprendido entre los electrodos.

**Coordinación de aislamiento.**- Es un procedimiento para determinar los niveles de aislamiento necesarios en los equipos de una instalación eléctrica y que puedan resistir las sollicitaciones dieléctricas que sufran en servicio normal y en presencia de sobretensiones.

**Up and down.**- Es el método más empleado para calcular la  $U_{50}$ .

**Desviación estándar.**- diferencia entre el valor medio y la tensión de 16% de probabilidad de producir descarga.