

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS” ZACATENCO

“DISEÑO DE UNA JAULA CORONA”

# TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTAN:

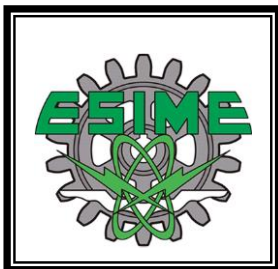
**JULIO ALBERTO MORAN HERNANDEZ**

**ALFONSO RADILLA ALBARRAN**

ASESORES:

**ING. FERMÍN PASCUAL ESPINO CORTÉS**

**ING. DANIEL RUIZ VEGA**



Ciudad de México

Mayo 2019

*Página intencionalmente en blanco*



*Página intencionalmente en blanco*

## Autorización de uso de obra

**Instituto Politécnico Nacional  
Presente**

Bajo protesta de decir la verdad los que suscriben **JULIO ALBERTO MORAN HERNANDEZ** y **ALFONSO RADILLA ALBARRAN** manifestamos ser autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada **“DISEÑO DE UNA JAULA CORONA”**, en adelante **“La Tesis”** y de la cual se adjunta copia en impreso y CD, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgamos a el **Instituto Politécnico Nacional**, en adelante **El IPN**, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales que tengan un valor académico, **“La Tesis”** por un periodo de **5 años** contando a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a **El IPN** de su terminación.

En virtud de lo anterior **El IPN** deberá reconocer en todo momento nuestra calidad de autores de **“La Tesis”**.

Adicionalmente, y en nuestra calidad de autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de **“La Tesis”**, manifestamos que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por los suscritos respecto de **“La Tesis”**, por lo que deslindamos de toda responsabilidad a **EL IPN** en caso de que el contenido de **“La Tesis”** o la autorización concedida afecte o viole los derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumimos las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México., a 20 de septiembre de 2019.

Atentamente



Julio Alberto Moran Hernández



Alfonso Radilla Albarrán

*Página intencionalmente en blanco*

## RESUMEN

El número de líneas de alta tensión de corriente directa instaladas a nivel mundial sigue creciendo, esto se debe principalmente a las ventajas que éstas ofrecen sobre las líneas de CA. Al diseñar una línea de transmisión de corriente directa, al igual que en las de corriente alterna, es necesario tomar en cuenta las pérdidas producidas por la descarga corona y los niveles de interferencia electromagnética que este tipo de descarga puede generar.

La descarga corona es una descarga parcial localizada sobre la superficie de un conductor que se presenta cuando el aire se ioniza por un alto campo eléctrico. La tensión de inicio de la descarga corona depende de varios factores tanto ambientales (presión, humedad y temperatura) como de factores geométricos de diseño (radio del conductor o geometría utilizada en el haz de conductores).

En este trabajo se analiza la descarga corona a través de un modelo que permite aproximar su tensión de inicio por medio del método de elemento finito. El modelo se programa con base en las ecuaciones presentadas por Olsen (2000), tomando el criterio de la avalancha electrónica como referencia para el inicio de la descarga corona.

El modelo se valida mediante mediciones en un arreglo experimental conocido como jaula corona, que es un arreglo cilíndrico diseñado para producir la distribución de campo eléctrico uniforme sobre la superficie del conductor bajo prueba. El conductor o arreglo de conductores centrales se energiza con una tensión de corriente directa positiva, mientras que el cilindro exterior de la jaula es sólidamente aterrizado. La corriente corona se mide mediante un transformador de corriente de alta frecuencia que permite registrar los pulsos streamers positivos, cuya aparición define el criterio para establecer el inicio de la descarga. La tensión de inicio se determinó experimentalmente para diferentes arreglos en haz de conductores (con un mismo radio de conductores, pero diferente separación entre ellos). Las pruebas experimentales fueron realizadas en el laboratorio de Alta Tensión de los Laboratorios Pesados II de la ESIME Zacatenco.

Una vez validado el modelo se presenta la propuesta de diseño de una jaula corona que se implementará en el laboratorio de Alta Tensión, con una tensión máxima aplicada de 150 kV de corriente directa y un diámetro de la jaula de 0.60 m. Esta jaula se diseña con el fin de probar conductores o arreglos de conductores con diámetros utilizados en la transmisión de energía eléctrica de alta tensión de corriente directa.

*Página intencionalmente en blanco*



## DEDICATORIA

A **mis padres** por brindarme la oportunidad de estudiar lejos de casa, por darme su confianza, su apoyo y su cariño incondicionalmente en todo momento, por aconsejarme en los momentos difíciles y estar conmigo en las alegrías que me ha brindado la vida.

A **mis hermanos** por ser parte de este proceso por apoyarme y aconsejarme a lo largo de este tiempo.

A mis familiares por preocuparse por mí y brindarme su apoyo.

Alfonso Radilla Albarrán

A **mi madre Claudia** por haberme apoyado en todo momento, por cuidar de mí, por sus consejos, por la motivación constante que me ha permitido lograr este objetivo, pero más que nada, por su amor incondicional.

A **mi padre Alberto** por enseñarme que la base del éxito es el trabajo y la constancia, por los valores que me inculco, los cuales me han permitido convertirme en una persona de bien.

A **mis hermanos Carolina y Gustavo** por alentarme en cada momento, escucharme y estar para mí cuando los necesito.

A **mis abuelos Fulgencio y María de la Luz** por su sabiduría, consejos y apoyo en cada momento.

A **mis abuelos Agustín y Estela** por tantos momentos de alegría y siempre confiar en mí, sabiendo que cumpliría mis objetivos.

Y a mis familiares que me brindaron su apoyo día a día en el transcurso de mi carrera universitaria.

Julio Alberto Moran Hernández

*Página intencionalmente en blanco*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al **Instituto Politécnico Nacional** por abrirme las puertas.

A la **ESIME Zacatenco** por darme los conocimientos y experiencias necesarias para la realización de este trabajo.

Al **Dr. Fermín Pascual Espino** por brindarnos su tiempo y dedicación para guiarnos, enseñarnos y darnos las herramientas necesarias para la culminación de esta tesis.

Al **Dr. Daniel Ruiz** por el apoyo y las enseñanzas brindadas durante este tiempo.

A **mis profesores** por las enseñanzas y consejos que me han llevado a culminar este trabajo.

Al **Ing. Roberto** por apoyarnos al momento de realizar las pruebas experimentales en el laboratorio de las altas tensiones.

A **Julio** por convertirse en más que mi compañero de trabajo, por el apoyo que me brindo dentro y fuera de la escuela.

A la **Familia Moran Hernández** por el apoyo y las atenciones brindadas a lo largo de este tiempo.

A mis amigos por sus experiencias y conocimientos aportados durante la elaboración de este trabajo.

Alfonso Radilla Albarrán

Al **Instituto Politécnico Nacional** por ser la cuna de mis estudios desde el nivel medio superior.

A la **ESIME Zacatenco y sus profesores** por el contribuir a mi preparación profesional.

Al **Dr. Fermín Pascual Espino** por sus enseñanzas, por el apoyo brindado y la oportunidad de desarrollar este trabajo, por la confianza y por haber dirigido este trabajo de tesis.

Al **Dr. Daniel Ruiz** por el apoyo, consejos y sugerencias durante el desarrollo de este trabajo.

A **Alfonso** por más que ser un colega, ser un gran amigo y gran persona.

A **Denisse** por acompañarme a lo largo del desarrollo de este trabajo y más.

A todos mis compañeros por la amistad brindada durante todos estos años.

Julio Alberto Moran Hernández

# CONTENIDO

	Página
<b>RESUMEN</b> .....	<b>VII</b>
<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>IX</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>XI</b>
<b>CONTENIDO</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 OBJETIVO.....	2
1.2.1 <i>Objetivos específicos:</i> .....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4 LIMITACIONES Y ALCANCES.....	3
1.4.1 <i>Limitaciones</i> .....	3
1.4.2 <i>Alcances</i> .....	4
1.5 ANTECEDENTES.....	4
1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	7
<b>CAPÍTULO 2 LA DESCARGA CORONA</b> .....	<b>9</b>
2.1 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	9
2.2 SISTEMAS DE ALTA TENSIÓN DE CORRIENTE CONTINUA.....	10
2.3 CAMPO ELÉCTRICO.....	11
2.4 DESCARGA CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	11
2.4.1 <i>Pérdidas de potencia por efecto corona en líneas de ATCA y ATCD</i> .....	13
2.5 ORIGEN FÍSICO DE LA DESCARGA CORONA.....	13
2.5.1 <i>Ionización en gases</i> .....	14
2.5.2 <i>Descarga de Townsend</i> .....	16
2.5.3 <i>Avalancha electrónica</i> .....	17
2.5.4 <i>Streamers</i> .....	17
2.6 CRITERIO DE INICIALIZACIÓN DE DESCARGA CORONA.....	19
2.7 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	20
2.7.1 <i>Ecuación de Laplace para campos electrostáticos</i> .....	21
2.8 JAULA CORONA.....	21
<b>CAPÍTULO 3 MODELO PARA EL CÁLCULO DE LA TENSIÓN DE INICIO DE LA DESCARGA CORONA</b> .....	<b>23</b>
3.1 TENSIÓN DE INICIO DE LA DESCARGA CORONA.....	23
3.2 METODOLOGÍA DE PROGRAMACIÓN.....	24
3.2.1 <i>Diagrama de flujo</i> .....	25
3.3 SIMULACIÓN DE DIFERENTES ARREGLOS DE CONDUCTORES.....	38
3.3.1 <i>Arreglo de un conductor</i> .....	39

	Página
3.3.2 Arreglo en haz de dos conductores.....	40
3.3.3 Arreglo en haz de cuatro conductores.....	42
<b>CAPÍTULO 4 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL Y DISEÑO DE UNA JAULA CORONA.....</b>	<b>45</b>
4.1 MEDICIÓN EXPERIMENTAL.....	45
4.1.1 Arreglo de un conductor.....	50
4.1.2 Arreglo en haz de dos conductores.....	51
4.1.3 Arreglo en haz de cuatro conductores.....	55
4.2 DISEÑO DE LA JAULA CORONA.....	59
4.2.1 Longitud de la jaula corona.....	59
4.2.2 Anillos equipotenciales.....	60
4.2.3 Soporte de la jaula.....	61
4.2.4 Propuesta de la jaula corona.....	63
4.3 SIMULACIÓN DE JAULA CORONA PROPUESTA, CON CONDUCTORES REALES.....	64
4.3.1 Modelado del campo eléctrico.....	68
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....</b>	<b>71</b>
5.1 CONCLUSIONES.....	71
5.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	72
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>73</b>

# LISTA DE FIGURAS

Página

FIGURA 1.1 JAULA CORONA UBICADA EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE ESTAMBUL, TURQUÍA [4] .....	5
FIGURA 1.2 JAULA CORONA MÓVIL [13] .....	6
FIGURA 2.1 TORRES DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA [9] .....	10
FIGURA 2.2 DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LA SUPERFICIE DE UN CONDUCTOR, EL COLOR ROJO OSCURO INDICA LA ZONA DE MAYOR INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO .....	12
FIGURA 2.3 IONIZACIÓN POR COLISIÓN SIMPLE.....	16
FIGURA 2.4 PRIMER COEFICIENTE DE TOWNSEND .....	16
FIGURA 2.5 STREAMER DE INCEPCIÓN POSITIVO.....	18
FIGURA 2.6 VISUALIZACIÓN DE UNA SIMULACIÓN MEF DE UNA JAULA CORONA. ....	20
FIGURA 2.7 JAULA CORONA [10] .....	22
FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÉTODO DE CÁLCULO.....	26
FIGURA 3.2 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS. ....	29
FIGURA 3.3 VARIABLES. ....	30
FIGURA 3.4 GRÁFICA SONDA DE PRUEBA ‘‘DIST’’ .....	30
FIGURA 3.5 GRÁFICA COMPARATIVA DE ALFA V.S. ETA .....	31
FIGURA 3.6 ALFA-ETA .....	31
FIGURA 3.7 GRÁFICA DE LA VARIABLE ‘‘ALFAEFF2’’ .....	32
FIGURA 3.8 GRÁFICA DE VARIABLE ‘‘XCRIT’’ .....	32
FIGURA 3.9 GEOMETRÍA DE LA JAULA CORONA.....	33
FIGURA 3.10 MATERIALES: AIRE EN TODOS LOS DOMINIOS. ....	34
FIGURA 3.11 SUPERFICIE DEL CONDUCTOR PUESTO BAJO POTENCIAL ELÉCTRICO.....	34
FIGURA 3.12 SUPERFICIE DE LA JAULA CORONA REFERENCIADA A TIERRA. ....	35
FIGURA 3.13 MALLADO DE LA JAULA CORONA. ....	35
FIGURA 3.14 MALLADO MUCHO MÁS DENSO EN EL SEGMENTO DE LÍNEA.....	36
FIGURA 3.15 SOLUCIÓN DEL MODELO DE LA JAULA CORONA.....	36
FIGURA 3.16 CONFIGURACIÓN DE LA LÍNEA DE INTEGRACIÓN.....	37
FIGURA 3.17 EVALUACIÓN DE LA INTEGRAL.....	38
FIGURA 3.18 ARREGLO DE UN CONDUCTOR. ....	39
FIGURA 3.19 ARREGLO EN HAZ DE DOS CONDUCTORES CON UNA DISTANCIA DE 0.001 [M] AL CENTRO DE LA JAULA CORONA. ....	40
FIGURA 3.20 ARREGLO EN HAZ DE DOS CONDUCTORES CON UNA DISTANCIA DE 0.0035 [M] AL CENTRO DE LA JAULA CORONA. ....	41

FIGURA 3.21 ARREGLO EN HAZ DE CUATRO CONDUCTORES CON UNA DISTANCIA DE 0.037 [M] AL CENTRO DE LA JAULA CORONA. ....	43
FIGURA 3.22 ARREGLO EN HAZ DE CUATRO CONDUCTORES CON UNA DISTANCIA DE 0.014 [M] AL CENTRO DE LA JAULA CORONA. ....	43
FIGURA 4.1 JAULA CORONA DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE ESIME ZACATENCO. ....	45
FIGURA 4.2 DIAGRAMA FÍSICO. ....	46
FIGURA 4.3 DESCARGA CORONA MEDIBLE. ....	47
FIGURA 4.4 FUENTE DE ALTO VOLTAJE DE CORRIENTE DIRECTA. ....	47
FIGURA 4.5 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE. ....	48
FIGURA 4.6 OSCILOSCOPIO. ....	49
FIGURA 4.7 DETECTOR ULTRASÓNICO. ....	50
FIGURA 4.8 ARREGLO DE DOS CONDUCTORES. ....	52
FIGURA 4.9 ARREGLO EN HAZ DE 4 CONDUCTORES. ....	56
FIGURA 4.10 CORTE LONGITUDINAL DE LA JAULA CORONA. ....	59
FIGURA 4.11 ANILLO EQUIPOTENCIAL. ....	60
FIGURA 4.12 VISTA FRONTAL DEL ROLADO PROPUESTO. ....	61
FIGURA 4.13 PRESENTACIÓN DE LA JAULA CORONA. ....	61
FIGURA 4.14 SOPORTE DISEÑADO PARA LOS CILINDROS DE LA JAULA CORONA. ....	62
FIGURA 4.15 SOPORTE DEL CONDUCTOR Y DE LOS ANILLOS EQUIPOTENCIALES. ....	63
FIGURA 4.16 DISEÑO FINAL DE LA JAULA CORONA. ....	64
FIGURA 4.17 MODELO DE JAULA CORONA PARA ESTUDIO EN 2D CON CONDUCTOR DE 21.77 [MM] DE DIÁMETRO. ....	66
FIGURA 4.18 CAMPO ELÉCTRICO DEL CONDUCTOR DE 21.77 [MM] DE DIÁMETRO. ....	66
FIGURA 4.19 GRÁFICA DEL CAMPO ELÉCTRICO DEL CONDUCTOR DE 21.77 [MM] DE DIÁMETRO. ....	67
FIGURA 4.20 GRÁFICA DEL ALFA EFECTIVO A LA CUAL EN EL CONDUCTOR DE 21.77 [MM] DE DIÁMETRO INICIA LA DESCARGA CORONA. ....	68
FIGURA 4.21 JAULA CORONA CON CONDUCTOR DE DIÁMETRO 27.03 MM Y ANILLOS EQUIPOTENCIALES ENVUELTOS EN AIRE. ....	69
FIGURA 4.22 POTENCIAL ELÉCTRICO Y DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN UN CONDUCTOR DE DIÁMETRO IGUAL A 27.03 [MM]. ....	69
FIGURA 4.23 DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LA JAULA CORONA PARA UN CONDUCTOR DE 27.03 MM DE DIÁMETRO. ....	70



# LISTA DE TABLAS

	Página
TABLA 3.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN PARA EL ARREGLO DE UN CONDUCTOR. ....	40
TABLA 3.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA EL ARREGLO DE UN CONDUCTOR. ....	40
TABLA 3.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN PARA EL ARREGLO DE DOS CONDUCTORES.....	41
TABLA 3.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA EL ARREGLO DE DOS CONDUCTORES.....	42
TABLA 3.5 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN PARA EL ARREGLO DE CUATRO CONDUCTORES.....	44
TABLA 3.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA EL ARREGLO DE CUATRO CONDUCTORES. ....	44
TABLA 4.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA MEDICIÓN DE UN CONDUCTOR. ....	50
TABLA 4.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE UN CONDUCTOR CON EL MODELO DE COMSOL MULTYPHISICS. ....	51
TABLA 4.3 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ARREGLO EN HAZ DE DOS CONDUCTORES SEPARADOS 0.005 [M].....	52
TABLA 4.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE UN ARREGLO EN HAZ DE DOS CONDUCTORES SEPARADOS 0.005[M] CON EL MODELO DE COMSOL MULTYPHISICS.....	53
TABLA 4.5 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ARREGLO EN HAZ DE DOS CONDUCTORES SEPARADOS 0.015 [M].....	53
TABLA 4.6 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL ARREGLO EN HAZ DE DOS CONDUCTORES SEPARADOS 0.015[M] CON EL MODELO DE COMSOL MULTYPHISICS.....	54
TABLA 4.7 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ARREGLO EN HAZ DE DOS CONDUCTORES SEPARADOS 0.04 [M].....	54
TABLA 4.8 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL ARREGLO EN HAZ DE DOS CONDUCTORES SEPARADOS 0.04 [M] CON EL MODELO DE COMSOL MULTYPHISICS. ....	55
TABLA 4.9 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ARREGLO DE CUATRO CONDUCTORES SEPARADOS 0.007 [M]. ....	56
TABLA 4.10 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CUATRO CONDUCTORES SEPARADOS 0.007 [M] CON EL MODELO DE COMSOL MULTYPHISICS. ....	57
TABLA 4.11 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ARREGLO DE CUATRO CONDUCTORES SEPARADOS 0.014 [M].....	57
TABLA 4.12 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CUATRO CONDUCTORES SEPARADOS 0.014 [M] CON EL MODELO DE COMSOL MULTYPHISICS. ....	57
TABLA 4.13 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ARREGLO DE CUATRO CONDUCTORES SEPARADOS 0.042 [M].....	58

TABLA 4.14 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CUATRO CONDUCTORES SEPARADOS 0.042 [M] CON EL MODELO DE COMSOL MULTYPHISICS. ....	58
TABLA 4.15 CONDUCTORES SIMULADOS LA JAULA PROPUESTA.....	65

# GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Jaula Corona.** Arreglo cilíndrico diseñado para producir la distribución de campo eléctrico uniforme sobre la superficie de un conductor bajo prueba.

**Campo eléctrico.** Describe las fuerzas existentes entre cargas eléctricas. El campo eléctrico en un punto del espacio producido por una o varias cargas eléctricas se define en términos de la fuerza que experimenta una unidad de carga estacionaria situada en dicho punto. El campo eléctrico  $E$  se expresa en volts por metro (V/m).

**Descarga corona.** Descarga auto sostenida que ocurre en la superficie de un conductor cuando el campo eléctrico alcanza el máximo campo eléctrico soportado por el gas aislante que rodea al conductor energizado.

**Ionización por colisión simple.** Proceso de adición o extracción de electrones a átomos por medio de impactos entre partículas.

**Descarga de Townsend.** Ionización de un gas donde los electrones libres están acelerados por un campo eléctrico suficientemente fuerte para aumentar la conductividad eléctrica a través del gas por un efecto de avalancha causada por la ionización de moléculas.

**Avalancha electrónica.** Proceso de multiplicación electrónica en el que cada electrón genera por impacto uno, dos o más electrones y hace crecer de manera exponencial a la población electrónica.

**Streamer.** Mecanismos de ruptura que forman campos eléctricos no uniformes.

**Método de los elementos finitos (MEF).** Elemento de cálculo para resolver numéricamente problemas planteados mediante ecuaciones diferenciales.

**Radio interferencia.** Degradación en el desempeño de un sistema eléctrico causado por un disturbio electromagnético.

**Descargas electrostáticas.** Fenómeno en el cual circula una corriente eléctrica repentina entre dos objetos de distinto potencial eléctrico.

**Rigidez dieléctrica.** Valor límite de la intensidad del campo eléctrico en el cual un material pasa de ser aislante a conductor.

***Gradiente.*** Variación de una magnitud en función de la distancia.

***Anillo equipotencial.*** Toroide hecho de material conductor para distribuir y homogeneizar la intensidad del campo eléctrico.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Al transmitir la energía por medio de líneas de alta tensión se produce un fenómeno conocido como la descarga corona, este fenómeno produce efectos indeseables en las líneas de alta tensión, y sobre algunos elementos ubicados cerca de éstas, tales como radio interferencia, pérdidas, descargas electrostáticas, ruido audible y la producción de gases corrosivos como el ozono [1]; es por ello que para el diseño y la operación de las líneas de alta tensión tanto de corriente directa (ATCD) como de corriente alterna (ATCA) se debe de tomar en cuenta este fenómeno.

La descarga corona es una descarga parcial y localizada que se presenta alrededor de la superficie de conductores de alta tensión, en los cuales el nivel de campo eléctrico rebasa la rigidez dieléctrica del aire. La descarga corona es un parámetro de gran importancia para tomar en cuenta a la hora de diseñar líneas de transmisión, debido a que éstas se diseñan tratando de minimizar la posibilidad de que se presente la descarga corona en los elementos energizados.

La transmisión de energía eléctrica en corriente alterna (CA) es ampliamente utilizada principalmente debido a la facilidad de transformación con el uso de máquinas eléctricas estáticas. Por otro lado, la idea del uso de corriente directa para la transmisión de la energía eléctrica surge en 1920, debido a la necesidad de transmitir mayores volúmenes de energía a mayores distancias; sin embargo, para esa época no había tanto avance tecnológico para el desarrollo de este tipo de líneas de transmisión. Fue hasta el año de 1970 con la llegada del tiristor que esta idea tomó fuerza [15]. La transmisión mediante líneas de corriente directa presenta ventajas con respecto a las líneas de corriente alterna, tales como: mayor capacidad de conducción, mejor estabilidad del sistema, disminución del derecho de vía, entre otras. Se ha demostrado que el uso de las líneas de corriente directa para transportar la energía eléctrica a grandes distancias resulta más económico que el uso de líneas de corriente alterna.

Por ello, países como China, Estados Unidos, Brasil, Canadá, Alemania han optado por usar los sistemas de corriente directa en alta tensión para el transporte de la energía eléctrica [15], en nuestro país se han evaluado estos sistemas de transmisión y se han presentado como una opción viable para su implementación en los próximos años, incluso hace un par de años se abrió una licitación para la primer línea de alta tensión de corriente directa, Yautepec-Ixtepec, la cual cruzará por los estados de Oaxaca, Puebla, Veracruz y Morelos [16]. Sin embargo, al ser una tecnología nueva en nuestro país, se requiere de entender el comportamiento de las líneas de ATCD, así como el tener conocimiento del diseño y operación de éstas. En algunos casos se requiere de realizar estudios experimentales para conocer todos los factores que puedan llegar a intervenir al momento que estén operando estos sistemas. Este es el caso de la descarga corona, fenómeno que es altamente dependiente de las condiciones de altitud, temperatura y humedad en las que se instala la línea.

A lo largo de estos años se han realizado diferentes estudios para analizar la descarga corona producida en sistemas de alta tensión de corriente directa. Debido al interés que se tiene sobre este fenómeno, a lo largo de los años se han establecido varios métodos para estudiar este fenómeno. Por ejemplo, se han empleado jaulas corona; una jaula corona es en general, una estructura metálica en forma cilíndrica que rodea un arreglo de conductores con el fin de reproducir la distribución del campo eléctrico a su alrededor, el cual debe ser similar en magnitud al de las líneas de transmisión reales en ambientes semi-controlados. Este arreglo permite analizar el campo eléctrico, el ruido producido por la descarga y cómo afecta el ambiente en el inicio de la descarga corona [4, 11, 13].

En este trabajo se implementa un modelo para determinar la tensión de inicio de la descarga corona utilizando el método del elemento finito. Con este modelo se realiza el diseño de una jaula corona de dimensiones tales que permita realizar pruebas experimentales con conductores de diámetros utilizados en líneas de alta tensión.

## **1.2 OBJETIVO**

Definir una metodología para determinar la tensión de inicio de la descarga corona mediante el uso del método del elemento finito que permita diseñar una jaula corona.

### **1.2.1 Objetivos específicos:**

- Definir una metodología para determinar la tensión de inicio de la descarga corona utilizando el método del elemento finito mediante el paquete comercial COMSOL.
- Modelar la distribución de campo eléctrico en la jaula corona.

- Diseñar una jaula que permita medir el inicio de la descarga corona en corriente directa utilizando conductores de radio estandarizado.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, estudios relacionados a la descarga corona y la radio interferencia electromagnética producida por ésta en líneas de alta tensión de corriente directa, han tomado gran interés en distintos países alrededor del mundo. Lo anterior se debe a la creciente necesidad de la instalación de líneas de alta tensión en corriente directa y por la importancia de la descarga corona en el diseño de éstas. La descarga corona define en gran medida el dimensionamiento de los conductores y herrajes, ya que estos no deben producir niveles interferencia electromagnética mayores a los establecidos en normas de referencia. En este proyecto se propone una metodología para determinar la tensión de inicio de la descarga corona con base a simulaciones de campo eléctrico mediante el uso de COSMOL Multiphysics, un paquete comercial basado en el método del elemento finito. Con el uso de metodología se diseñará una jaula corona que permita el registro de las corrientes producidas por la descarga corona en la superficie de los conductores con diámetros normalizados. Lo anterior ayudará a establecer criterios de diseño de los sistemas de transmisión de corriente directa, y permitirá analizar los efectos electromagnéticos producidos por sistemas ATCD.

Los resultados de este trabajo proporcionarán información relevante acerca de la descarga corona en las líneas de transmisión de corriente directa que en un futuro se puedan desarrollar a lo largo del sistema eléctrico nacional.

### 1.4 LIMITACIONES Y ALCANCES

#### 1.4.1 Limitaciones

En el presente trabajo se realiza el diseño de una jaula corona que nos permita analizar este fenómeno en líneas de transmisión de corriente directa, con una tensión máxima del inicio de la descarga corona de 150 kV.

Se realiza el diseño con base a las limitaciones de espacio disponible en el laboratorio de alta tensión de la ESIME -Zacatenco.

La comprobación del modelo propuesto para el cálculo de la tensión de inicio de la descarga corona se valida con una fuente que proporciona un máximo de 50 kV con polaridad positiva.

### **1.4.2 Alcances**

Se desarrolla una metodología para el cálculo de la tensión de inicio de descarga corona que permite incluir algunas condiciones atmosféricas, tales como presión, y temperatura.

Se comprueba experimentalmente el método de cálculo de la tensión de inicio de la descarga corona en una jaula corona ubicada en el laboratorio de alta tensión de ESIME Zacatenco.

Se diseña el arreglo de una jaula corona cilíndrica modelada en 3D en el software Auto CAD, presentando las medidas de la misma de manera bidimensional.

El método de cálculo y las simulaciones para la obtención de inicio de la descarga corona de los diferentes arreglos de conductores se realiza en un modelo de dos dimensiones en el software COMSOL Multyphysics.

## **1.5 ANTECEDENTES**

El concepto de la descarga corona no es un concepto nuevo, su estudio en las líneas de transmisión de corriente alterna inició desde que se empezaron a utilizar altas tensiones para el transporte de la energía eléctrica. Inicialmente, su estudio fue extenso en líneas de alta tensión de corriente alterna, pero ahora con la creciente implementación de las líneas de transmisión en corriente directa en diferentes países alrededor del mundo ha surgido un gran interés por caracterizar esta descarga en líneas de CD de alta tensión.

El estudio de la descarga corona en líneas de transmisión de CD ha sido abordado en países en los cuales ya se tiene sistemas ATCD, buscando mejorar el desempeño de las líneas, y también en países en los que se busca implementarla. En 2017, [4] F. P. Espino Cortés de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la Escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) unidad Zacatenco inició un proyecto conjunto con el departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad Técnica de Estambul Turquía, en la cual se realiza una investigación que busca caracterizar el efecto de la altitud sobre el nivel del mar de la descarga corona en corriente directa de polaridad negativa y positiva. Para lo anterior se realizan pruebas experimentales en una jaula corona de 60 [cm] de diámetro y 300 [cm] de largo en conductores con un diámetro de 1.3 [mm], 2.2 [mm], 2.8 [mm] y 7 [mm], ver Figura 1.1. Para cada conductor o arreglo de conductores se obtuvo la tensión de inicio de la descarga corona, la corriente que genera dicha descarga y las pérdidas que produce. Los resultados muestran el efecto de la polaridad y se comparan con los obtenidos para tensiones de corriente alterna.



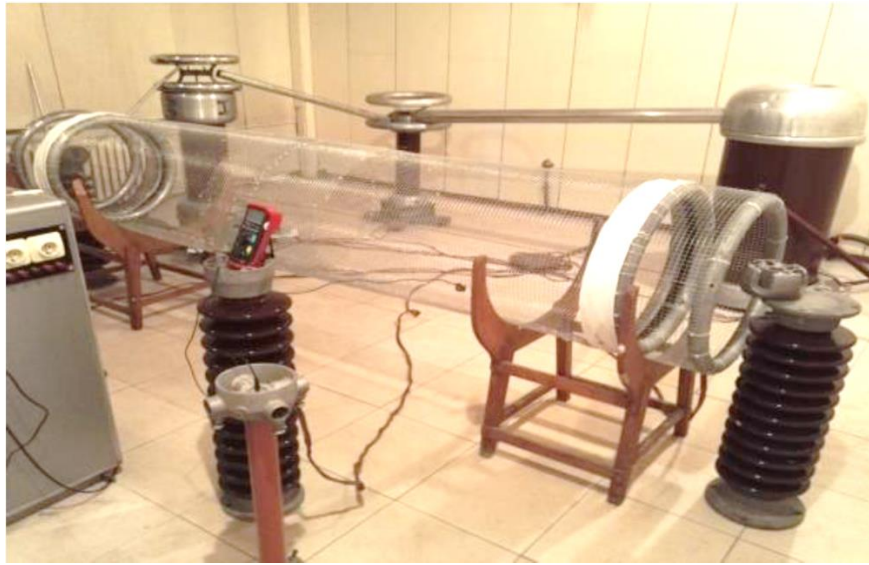


Figura 1.1 Jaula corona ubicada en la universidad técnica de Estambul, Turquía [4]

En el mismo año J. S. Djeumen y J. J. Walker [3] de la Universidad Vaal de Tecnología en Sudáfrica realizaron una investigación, en la cual su principal objetivo fue la de terminar la influencia de la temperatura, la presión del aire en la tensión de inicio de la descarga corona, ellos demostraron el impacto que tienen estos factores del ambiente en la tensión de inicio. Esta investigación la llevaron a cabo en su laboratorio, ubicada en el laboratorio de la Universidad Vaal de Tecnología para altas tensiones en corriente directa de polaridad positiva y negativa, en una jaula corona de forma cilíndrica con dos secciones de guarda de 0.5 [m] y dos secciones centrales de medición de 1 [m] cada una. Los resultados de este estudio muestran que la descarga corona decrece un poco con el incremento de la temperatura al estar sometido el conductor a una fuente de corriente directa, mientras que al aplicarle al conductor alta tensión de corriente directa con polaridad negativa la tensión de inicio de la descarga es de menor valor que cuando se aplica alta tensión de corriente directa con polaridad positiva.

Hongbo Liu en colaboración con otros investigadores realizaron un estudio acerca de la distribución de la carga espacial alrededor del conductor en una jaula corona pequeña [12]. En la investigación realizada en el 2017, se habla acerca de cómo con el incremento del nivel de tensión en las líneas de corriente directa el espaciamiento de la carga en el aire llega a afectar en el inicio de la descarga corona, las condiciones en las que se mantiene y las pérdidas que produce. En este estudio mediante sensores de audio se varía el espaciamiento de la densidad de la carga y además se crea un modelo en el cual se simulan los conductores bajo prueba, utilizando el método del elemento finito (MEF) para tener una mayor precisión en el cálculo. En este estudio se encontró que el incremento en el espaciamiento de la carga aumenta en función de la tensión aplicada.

En 2017, Investigadores de la Universidad de Witwatersrand en conjunto con el servicio público de electricidad de Sudáfrica [13] realizaron dos investigaciones, la primera fue el efecto que tiene la altitud en el ruido producido por el efecto corona en un conductor bajo tensión de corriente directa en el cual se evaluó el ruido audible en un conductor a diferentes altitudes en Sudáfrica. Para este trabajo se utilizó una jaula corona móvil (Figura 1.2), con la finalidad de realizar las pruebas a diferentes alturas. La segunda investigación realizada fue el efecto de la humedad y temperatura en el inicio de la descarga corona. El resultado para el primer estudio indicó que el ruido producido por un conductor que está bajo la descarga corona es mucho mayor cuando se está en ambientes con baja humedad y altas temperaturas, mientras que en el segundo estudio se encontró que la magnitud del campo eléctrico producido por la descarga corona es dependiente de la densidad relativa del aire.



Figura 1.2 Jaula corona móvil [13]

En el año 2018 Robert G. Olsen en conjunto con miembros del IEEE [11] realizaron un estudio acerca de pruebas realizadas a los equipos en alta tensión, haciendo pruebas en laboratorio y simulaciones. En general se habla acerca de que los equipos utilizados en las líneas de alta tensión son diseñados para que estén libres del efecto corona o por lo menos éste sea mínimo en ellos. Se menciona que el realizar las pruebas en un laboratorio tiene una problemática de gran magnitud, esto debido a que las condiciones físicas en las cuales se realizan las pruebas a los equipos (en su caso) no son las condiciones reales a las que un equipo de este tipo deba de ser sometido. Sugiere que el adecuar el laboratorio para realizar las pruebas con condiciones parecidas se llevaría un gasto monetario alto, por lo cual, los resultados obtenidos mediante el uso de simulaciones pueden llegar a ser bastante más parecidos a los resultados que se obtienen en una instalación real en campo.

Los estudios previamente mencionados son solo algunos de los trabajos recientes que se han hecho con relación al efecto corona, como se puede observar en ellos la descarga corona puede ser estudiada en arreglos cilíndricos (jaulas corona) que ayudan a reproducir el efecto corona a menores tensiones y también resulta interesante cómo se propone que el uso de simulación de campo eléctrico mediante métodos numéricos puede llegar a ser más representativa de lo que se esperaría realmente en una líneas de alta tensión que la información que se puede obtener en pruebas experimentales de laboratorio, en las cuales la simplificación de los arreglos puede alejar los resultados de los valores reales.

## 1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Capítulo 1: Introducción. En este capítulo se presenta el planteamiento del problema, los antecedentes, la descripción de los objetivos, la justificación, el estado del arte sobre el tema.

Capítulo 2: La descarga corona. En este capítulo se exponen los diferentes temas relacionados con la descarga corona. Iniciando por la definición de una línea de transmisión, y analizando la diferencia de las pérdidas por descarga corona en una línea de alta tensión de corriente directa y una de corriente alterna. A su vez se explica el fenómeno físico y su origen, explicando los diferentes tipos de ionización que existen, de esta manera se define la matemática capaz de predecir el efecto corona. Por último, se menciona la definición de la jaula corona, así como las partes que la constituye.

Capítulo 3: Modelo para el cálculo de la tensión de inicio de la descarga corona. En este capítulo, se presenta el desarrollo y resultados del modelado de una jaula corona cilíndrica, se busca una distribución no-uniforme del campo con esta geometría. Entendiendo la descarga corona como una función del campo eléctrico. Se exhibe un modelo para determinar la tensión de inicio de la descarga corona.

Capítulo 4: Mediciones experimentales de la tensión de inicio de la corona en CD. En este capítulo se hace la validación del método de cálculo de la tensión de inepción mediante pruebas experimentales en una jaula corona ubicada en el laboratorio de alta tensión de la ESIME-Z, además se presentan las medidas del diseño de jaula corona para diámetros de estandarizados de conductores y se presenta su simulación en COMSOL Multyphysics con diferentes calibres.

Capítulo 5: Conclusiones. Se presentan las conclusiones generales del trabajo, haciendo énfasis en las aportaciones, así como los trabajos que pueden desarrollarse a futuro.

*Página intencionalmente en blanco*

# CAPÍTULO 2

## LA DESCARGA CORONA

### 2.1 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Una línea de transmisión es el conjunto de elementos y dispositivos que se emplean para transportar energía eléctrica desde una fuente de generación a un punto de consumo.

En términos generales, el proceso desde la producción hasta el consumo por el usuario final es el siguiente: La energía generada se transporta en grandes bloques a través de las líneas de transmisión, las cuales se interconectan por medio de subestaciones ubicadas tanto en los centros de generación, como en los sitios donde se hace la reducción de la tensión que permite distribuir la energía a los consumidores finales.

El transporte de grandes bloques de energía corresponde al proceso de transmisión el cual se hace a altos niveles de tensión. Antes de llegar al usuario final, la energía eléctrica se transforma a niveles de media tensión y a través de redes, nuevas subestaciones y nuevos transformadores, se lleva hasta los puntos de consumo. Este transporte de bloques menores de energía con destino al usuario final se denomina: distribución. La actividad de comercialización se encarga de comprar energía a los generadores, pagar el servicio de transporte a transmisores y distribuidores y venderla al usuario final.

Generalmente, la transmisión de energía eléctrica se proporciona por vía aérea (ver Figura 2.1), esto debido a que el aislamiento utilizado es el aire lo que hace que este método sea el de costo más bajo para la transmisión de grandes cantidades de energía eléctrica. Las líneas aéreas, en su mayoría, se constituyen por conductores desnudos, (normalmente están hechos de aluminio, aluminio reforzado con acero, o materiales compuestos).

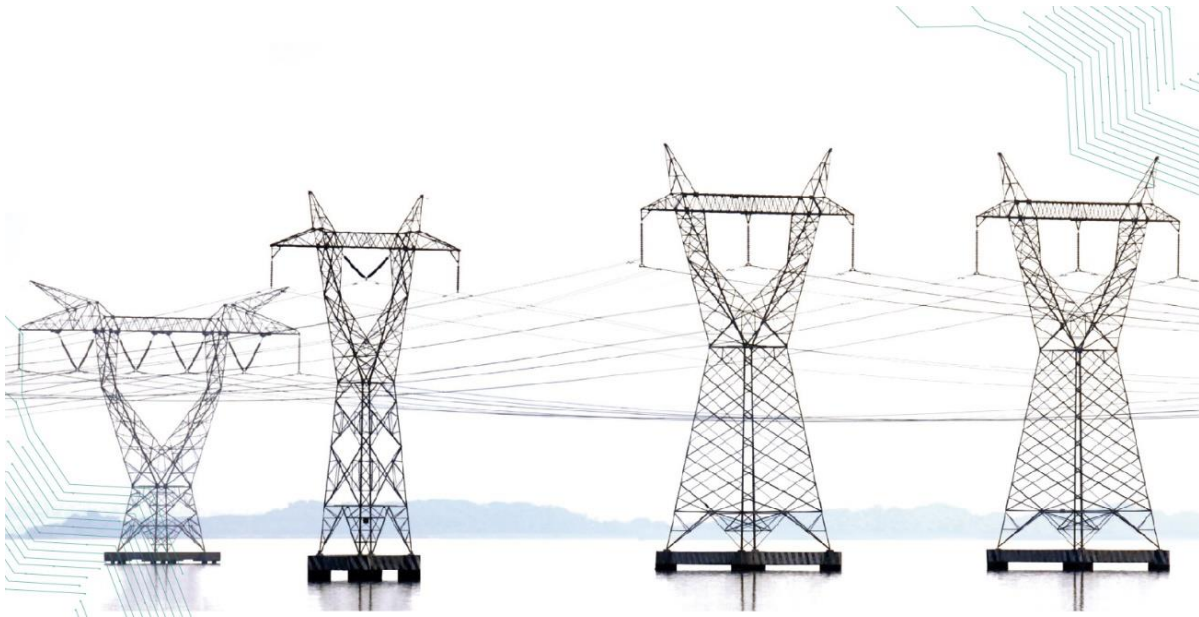


Figura 2.1 Torres de transmisión eléctrica [9]

Para el transporte de grandes potencias se usan universalmente los sistemas de corriente alterna. Se ha llegado a ello como consecuencia de la simplicidad de los grandes generadores y transformadores de dicha corriente. La tensión de transmisión puede ser adaptada a las necesidades del servicio con mayor sencillez y economía que en caso de sistemas de corriente continua.

## **2.2 SISTEMAS DE ALTA TENSIÓN DE CORRIENTE CONTINUA**

Las ventajas económicas de los sistemas de transmisión de corriente continua, el avance de la electrónica de potencia, así como el desarrollo de convertidores (AC a DC) e inversores (DC a AC) ha provocado que se utilicen cada vez más estos sistemas. La transmisión eléctrica en corriente continua permite reducir la tensión, en comparación con los sistemas trifásicos, por lo que puede reducirse del peso relativo del conductor para una tensión máxima dada.

Existen tres tipos de líneas de alta tensión de corriente continua. La primera es la línea unipolar de transmisión, la cual es conformada por un solo conductor ya sea de polaridad positiva o negativa, este arreglo utiliza la tierra como conductor de retorno de la corriente [1]. La mayoría de las líneas de transmisión de corriente continua son de tipo bipolar. Un solo circuito puede ser convertido a un circuito bipolar de corriente continua usando dos conductores, un polo positivo y un polo negativo [2]. El tercer tipo de línea es la línea homopolar, ésta es similar a la línea bipolar exceptuando que ambos conductores son de la misma polaridad. El retorno de corriente debe, por lo tanto, ser por medio de la tierra [1].

Otra ventaja del uso de líneas de transmisión de Corriente Continua es el hecho que éstas no contribuyen a la corriente de corto circuito [1], a diferencia de los sistemas de corriente alterna, a su vez el conductor de tierra puede ser usado como conductor de retorno (neutro) independientemente del entorno en que se encuentre el circuito, incrementando así, la confiabilidad de operación. [1]

### 2.3 CAMPO ELÉCTRICO

El concepto de campo eléctrico fue introducido en la teoría electromagnética para describir las fuerzas existentes entre cargas eléctricas. El campo eléctrico en un punto del espacio producido por una o varias cargas eléctricas se define en términos de la fuerza que experimenta una unidad de carga estacionaria situada en dicho punto. El campo eléctrico  $E$  se expresa en volts por metro (V/m), o su múltiplo kV/m (1 kV/m = 1.000 V/m).

El valor del campo eléctrico es función de la tensión del sistema eléctrico; es decir, cuanto mayor sea la tensión del dispositivo más intenso será el campo eléctrico que genere.

El gradiente de la tensión es igual a la intensidad de campo eléctrico se muestra en la ecuación (2.1) para coordenadas cartesianas [1]. El campo eléctrico es un vector cuya magnitud es igual a la máxima razón de cambio de la tensión y cuya dirección es igual a la dirección del cambio más rápido de ésta.

$$E = -\nabla u = -\left(a_x \frac{\partial u}{\partial x} + a_y \frac{\partial u}{\partial y} + a_z \frac{\partial u}{\partial z}\right) \quad (2.1)$$

La magnitud del campo eléctrico en un material dieléctrico se define como esfuerzo eléctrico. Mientras que la rigidez dieléctrica es el campo eléctrico al cual ocurre la falla eléctrica o ruptura de un material aislante.

### 2.4 DESCARGA CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Uno de los fenómenos eléctricos muy comunes en las líneas de alta tensión es la descarga corona. La descarga corona es una descarga autosostenida que ocurre en la superficie del conductor cuando su campo eléctrico alcanza el máximo campo eléctrico soportado por el gas aislante que rodea al conductor energizado, es decir, cuando el campo eléctrico es mayor que la rigidez dieléctrica del gas. Existen muchos factores que influyen en la aparición de la descarga corona entre estos están: el radio del conductor, el material de éste, la superficie del conductor, la humedad y la temperatura ambiente. [4]



Cuando un conductor de una línea adquiere un potencial elevado da lugar a un gradiente del campo eléctrico radial superior a la rigidez dieléctrica del aire, generando la corriente de corona [5], la cual se origina porque las moléculas del aire se ionizan instante en el cual se considera que el gas, típicamente aire, se vuelve conductor.

En la Figura 2.2 se muestra la distribución del campo eléctrico radial sobre un conductor cilíndrico sometido a una alta tensión eléctrica. Se puede observar, que el gradiente de potencial disminuye conforme se aleja de la superficie del conductor, el color rojo oscuro indica el campo de mayor intensidad.

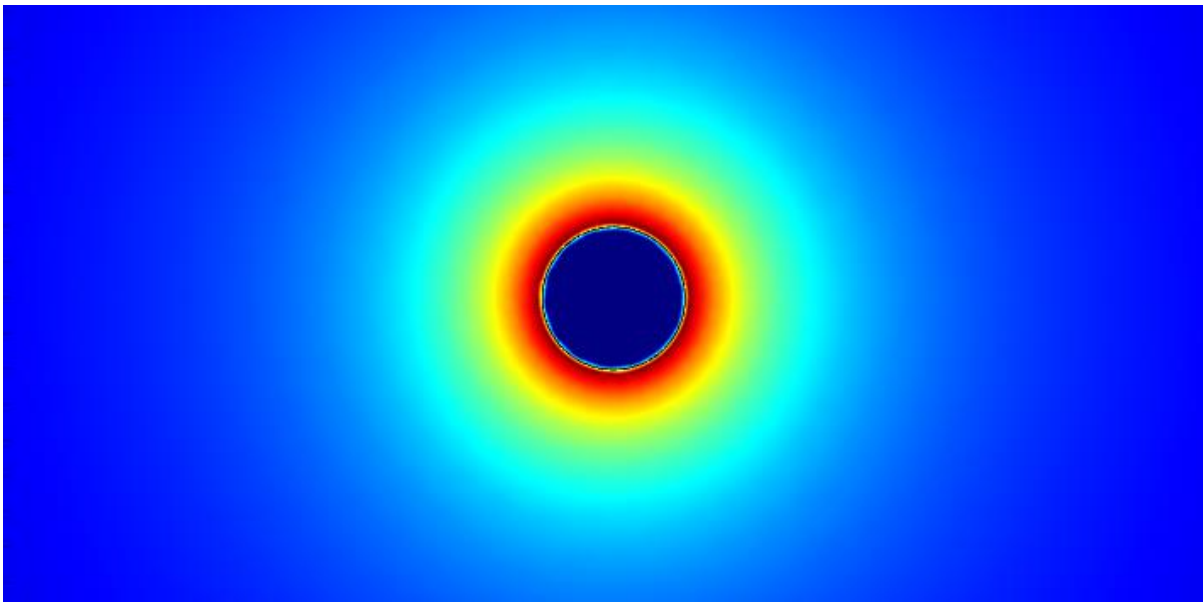


Figura 2.2 Distribución del campo eléctrico en la superficie de un conductor, el color rojo oscuro indica la zona de mayor intensidad de campo eléctrico.

La descarga corona genera pérdidas de potencia eléctrica, daños a algunos elementos de las líneas de alta tensión e interferencia electromagnética en un amplio rango de frecuencia. Debido a lo anterior es muy importante considerar la descarga corona cuando se diseña una línea de transmisión, tratando siempre de evitar su aparición en la superficie de los conductores y herrajes energizados.

Las líneas eléctricas de alta tensión se diseñan para que la descarga corona no ocurra en condiciones normales de operación. Sin embargo, las variaciones normales de tensión y los cambios de las condiciones del ambiente que rodea la línea, tales como la humedad, la lluvia o la niebla, pueden hacer que la descarga corona ocurra.

Fórmulas empíricas indican que para líneas limpias y con superficies lisas, el campo eléctrico necesario para la aparición de la descarga corona en polaridad negativa es ligeramente menor que los de polaridad positiva [1], aunque en el caso positivo la amplitud de los pulsos corona es mucho mayor.



La aparición de la descarga corona es altamente dependiente del estado de la superficie del conductor; ya sean las rugosidades, irregularidades, defectos, o impurezas adheridas, reducen considerablemente la tensión de inicio de la descarga. Por otro lado, el número de sub-conductores por fase o por polo (en el caso de líneas de CD), incrementan la tensión de inicio la descarga corona.

#### **2.4.1 Pérdidas de potencia por efecto corona en líneas de ATCA y ATCD**

Para una línea de transmisión de corriente alterna, las pérdidas por efecto corona están dadas en función de las dimensiones del conductor y del gradiente en la superficie de éste; esto significa que un cambio en el gradiente de potencial en la superficie de los conductores de CA tiene el mismo resultado en cuanto a pérdidas si se produce un cambio de tensión o el cambio de espaciamento entre las fases. Por otro lado, las pérdidas por efecto corona en una línea de ATCD dependen del tipo de arreglo y del espaciamento entre los conductores (polos), incluso si el gradiente en la superficie del conductor se mantiene constante. [6]

Otra diferencia importante son las condiciones climáticas, por ejemplo, para una línea de AC las pérdidas por efecto corona en condiciones normales son despreciables, mientras que en un ambiente desfavorable las pérdidas se pueden incrementar cien por ciento o más veces. En comparación, en las líneas de DC las pérdidas por efecto corona son considerables tanto en un ambiente normal de operación como en un ambiente desfavorable. [6]

Algunos factores que influyen en las pérdidas por efecto corona en las líneas de transmisión de corriente continua son:

- Humedad relativa del aire.
- Temperatura.
- Presión atmosférica

### **2.5 ORIGEN FÍSICO DE LA DESCARGA CORONA**

El aire es tal vez el material aislante más importante que se usa en las líneas de transmisión de alta tensión, éste es el medio entre la alta tensión y las estructuras de soporte metálico a potencial de tierra, así como el plano de tierra, por esta razón es importante conocer las características físicas y eléctricas del aire atmosférico y las condiciones bajo las cuales mantiene sus propiedades aislantes o se vuelve conductor. Los principales componentes del aire son numerosos elementos gaseosos y vapor de agua. El vapor de agua dependerá de la temperatura ambiente mientras que los gases en el aire dependerán de qué tan seco sea éste [1]. Los iones y electrones que son los

principales portadores de carga provienen principalmente de la radiación cósmica y de sustancias radioactivas, ambos son necesarios para el proceso de ionización.

Se considera que a nivel del mar el aire contiene alrededor de 1000 iones positivos y 1000 iones negativos por centímetro cúbico. Esta cantidad es la causa de que el aire sea ligeramente conductor, es decir no es un aislante perfecto [7].

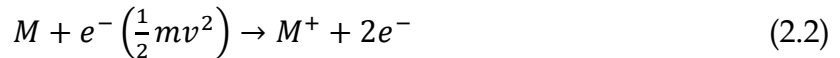
Los gases en condiciones normales son excelentes aislantes, el aire tiene una conductividad del orden de  $10^{-17}$  A/cm<sup>2</sup>, sin embargo, cuando el aire es sometido a un intenso campo eléctrico, éste pasa de ser aislante a ser un gas ionizado, por el cual fluyen corrientes del orden de  $10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>. Este salto de conductividad se identifica como el inicio de la descarga corona en campos no uniformes y en el caso de campos uniformes, el inicio del proceso que muy probablemente lleve a la ruptura del gas [7].

### 2.5.1 Ionización en gases

Existen cuatro procesos relevantes de la ionización en los gases:

- a) Ionización por colisión simple
- b) Excitación
- c) Ionización por doble impacto electrónico
- d) Foto ionización

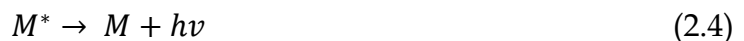
a). Ionización por colisión simple: Cuando la energía cinética de un electrón ( $\frac{1}{2}mv^2$ ) que colisiona con una molécula neutra, excede la energía de ionización ( $Ei = eVi$ ) de la molécula, entonces se produce la ionización (es decir  $\frac{1}{2}mv^2 > Ei$ ). Básicamente la ionización por colisión simple se define en la ecuación (2.2).



b). Excitación: Cuando la energía cinética adquirida por el electrón no es suficiente para producir la ionización por impacto, la molécula puede llegar a quedar en un estado excitado  $M^*$ , con una energía  $Ee$



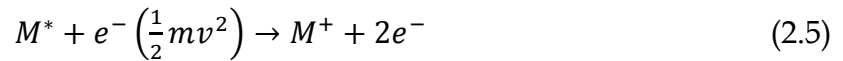
Esta molécula excitada puede posteriormente libera un fotón de energía con frecuencia  $\nu$  y con una energía emitida igual a  $h\nu$ . La energía es liberada cuando el electrón brinca de una órbita hasta la próxima, como se observa en la siguiente ecuación:



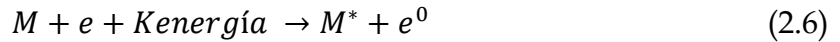
donde:

$h =$  Constante de Planck  $= 6.624 \times 10^{-34} \text{ Js}$

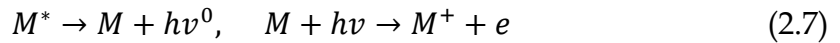
c). Ionización por doble impacto: Si una molécula se encuentra en estado de excitación (con una energía  $Ee$ ) debido a una colisión electrónica previa, una segunda colisión aún con poca energía puede llegar a ionizar la molécula. El electrón involucrado en la segunda colisión puede requerir una energía menor que la energía de ionización, pero al sumarse a la energía de la molécula excitada rebasa la energía de ionización como se describe en la ecuación 2.5:



d). Foto ionización: La foto ionización se define como la ionización por la colisión de un fotón de alta energía con una partícula neutra. Cuando un electrón con una energía menor que la de ionización choca contra un átomo o molécula ( $M$ ) de un gas, puede llevarlos a un estado con un nivel mayor de energía, siguiendo la siguiente ecuación:



El átomo o molécula excitada ( $M^*$ ) radia un quantum de energía o energía de fotón ( $h\nu$ ), la cual puede llegar a ionizar a otro átomo o molécula cuyo potencial de ionización ( $eVi$ ) es menor o igual que la energía del fotón.



De estos cuatro procesos el proceso de ionización por colisión simple es el más importante para la realización de este trabajo por la descarga que se produce comúnmente conocido como "avalancha electrónica" la cual se representa en la Figura 2.3.

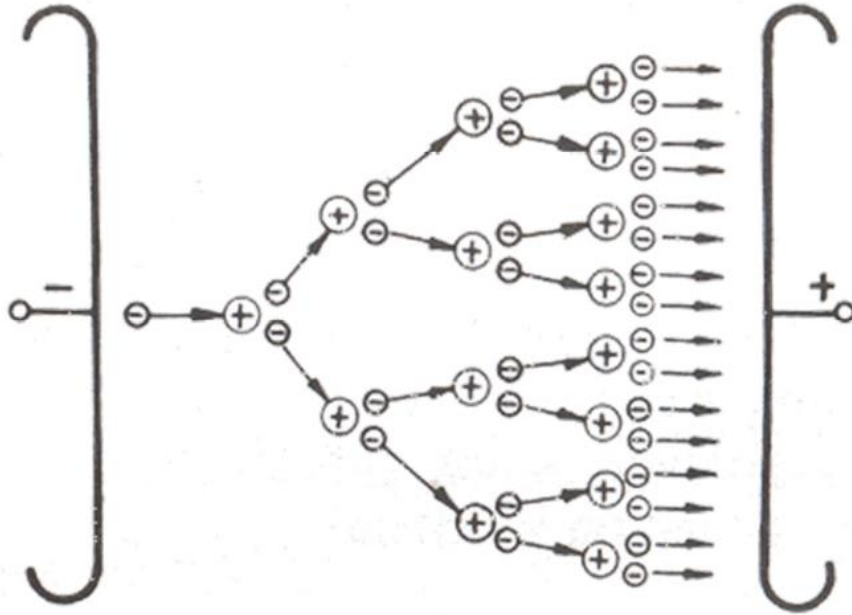


Figura 2.3 Ionización por colisión simple

### 2.5.2 Descarga de Townsend

La descarga de Townsend es definida como la ionización de un gas donde los electrones libres están acelerados por un campo eléctrico suficientemente fuerte para aumentar la conductividad eléctrica a través del gas por un efecto de avalancha causada por la ionización de moléculas. Cuando decrece el campo eléctrico el fenómeno desaparece. Esto se puede apreciar con el primer coeficiente de Townsend ( $\alpha$ ) que se muestra en la Figura 2.4, en la cual la tensión requerida para ionizar un gas está representada por la línea de color negro, caso contrario la línea de color rojo representa los electrones dentro de la avalancha electrónica para lograr la ionización del gas:

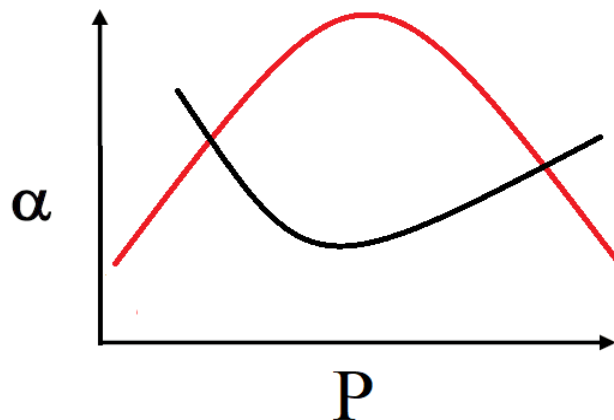


Figura 2.4 Primer coeficiente de Townsend

Donde  $\alpha$  depende de la presión del gas  $p$ , y la energía cinética del electrón que se impacta. Datos experimentales de coeficiente de ionización en diferentes gases son usualmente expresados por fórmulas empíricas como la siguiente:

$$\alpha = pf \left( \frac{E}{p} \right) \quad (2.8)$$

o

$$\frac{\alpha}{p} = f \left( \frac{E}{p} \right) \quad (2.9)$$

En muchos gases se puede presentar captura ( $\eta$ ) y para relaciones de  $E/p$  se puede dificultar la obtención de los valores de  $\alpha$  y  $\eta$  separadamente por lo que se hace necesario definir para este caso un coeficiente de ionización efectivo dado por  $\alpha' = \alpha - \eta$

Los procesos de captura pueden expresarse acumulativamente en analogía con el primer coeficiente de Townsend, por un coeficiente  $\eta$ , que define el número de capturas producidas en la trayectoria de un electrón de una distancia de 1 cm en la dirección del campo. [7]

La diferencia de  $\alpha - \eta$  puede ser expresada por  $\alpha'$  que es el coeficiente efectivo de ionización. Los gases con un coeficiente de captura alto tienen una mayor resistencia dieléctrica, lo que hace a estos gases aislantes importantes dentro de la industria eléctrica.

### 2.5.3 Avalancha electrónica

La forma típica de una avalancha es una cuña, y se debe a la difusión térmica de los electrones en la punta de la avalancha que se calientan por la aceleración producida por el campo eléctrico.

La cabeza de la avalancha está formada por electrones y la cola por iones positivos. Los iones moviéndose lentamente dan la forma cónica a la cola. [7]

### 2.5.4 Streamers

Los streamers son mecanismos de ruptura que forman campos eléctricos no uniformes.

Los streamers de acuerdo a la polaridad del electrodo energizado se clasifican en positivos y negativos.

### 2.5.4.1 Streamers positivos

En la vecindad de un electrodo positivo, donde el campo es divergente, un streamer puede desarrollarse a partir de ahí. Esto consiste en que la propagación del streamer da seguimiento a una serie de pasos individuales. Cada paso es esencialmente una avalancha creciendo hacia el electrodo negativo. Para la propagación continua de un streamer hacia el electrodo negativo es necesario un campo eléctrico de gran magnitud o un tamaño crítico de la avalancha.

Un streamer positivo es equivalente a una súbita inyección de una carga negativa ( $-q$ ) hacia el electrodo positivo, al inicio de la propagación del streamer y posteriormente para un aparente arrastre de una carga positiva ( $+q$ ) hacia adentro del espacio interelectrodico, la velocidad de arrastre es igual a la velocidad del streamer. En la Figura 2.5, se observa la forma de onda de un streamer de inyección positivo.

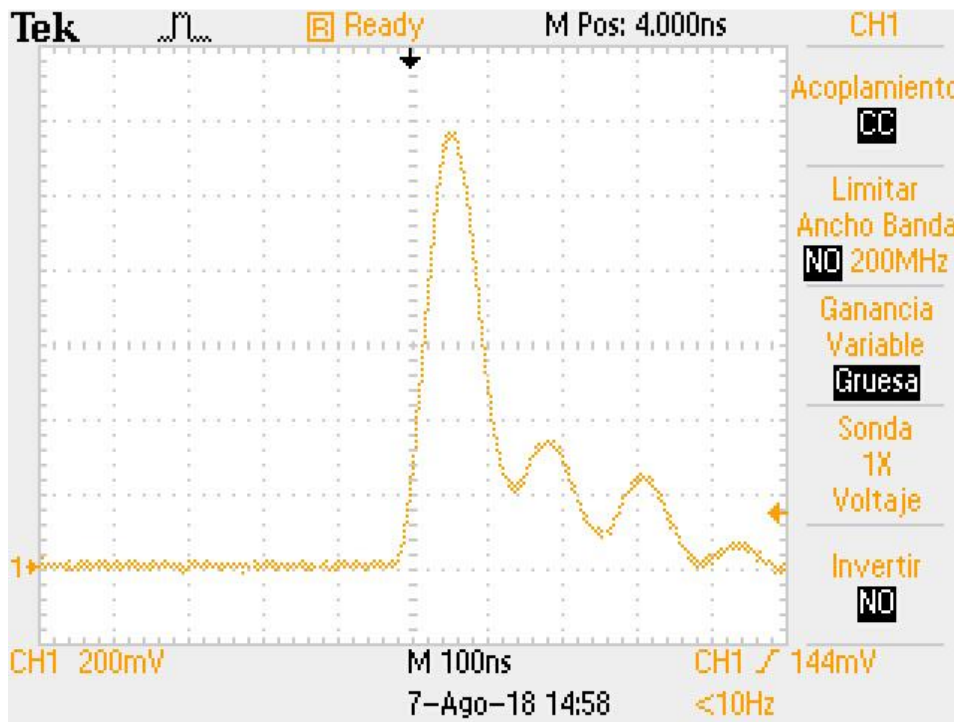


Figura 2.5 Streamer de inyección positivo

### 2.5.4.2 Streamer negativo o pulsos Trichel

En la vecindad de un electrodo negativo, donde el campo es convergente, el desarrollo de un streamer negativo es similar al desarrollo de un streamer positivo solo que, de forma inversa, yendo de un electrodo negativo a un positivo.

Esencialmente, el streamer negativo o pulso trichel consiste de una carga ( $-q$ ) arrastrada hacia el espacio interelectrodico a una velocidad definida.

Estos pulsos son más regulares que los streamers positivos, tanto en frecuencia como en magnitud. Incrementan su frecuencia de forma lineal con respecto a la tensión, y a diferencia con los streamers positivos, la frecuencia no decrece hasta alcanzar un valor máximo o crítico. La amplitud de los pulsos Trichel se reduce con el incremento de la frecuencia.

### 2.5.4.3 Fórmula de Peek

En 1920, el ingeniero americano F. W. Peek, dedujo mediante métodos experimentales, fórmulas empíricas que permiten calcular los valores de las tensiones críticas disruptivas, visuales y las pérdidas correspondientes que produce la descarga corona [18].

La fórmula de Peek es una fórmula semiempírica y calcula el campo eléctrico para el inicio de la descarga corona, esta fórmula se limita a poder calcular el inicio de la descarga corona solo para arreglos geométricos coaxiales de un solo conductor central y en donde el campo geométrico superficial de los conductores sea prácticamente constante [18].

Esta fórmula es definida por el factor de rugosidad ( $m$ ), el radio de los conductores ( $r$ ), la densidad relativa del aire ( $\delta$ ) y unas constantes empíricas que tomarán valor según la naturaleza de la tensión aplicada sea corriente directa positiva o negativa. Esto lo podemos observar en la ecuación 2.10 [19].

$$E_{0ns} = mE_0\delta \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r}}\right) \quad (2.10)$$

Debido a que esta ecuación solo se puede utilizar en algunos arreglos geométricos específicos (típicamente con un solo conductor), en este trabajo no se utilizará para calcular el inicio de la descarga corona.

## 2.6 CRITERIO DE INICIALIZACIÓN DE DESCARGA CORONA

Un análisis detallado de las condiciones de corriente positivas y negativas de la inicialización de la descarga corona, sugiere que esta depende del campo eléctrico, presión y temperatura; y que su desarrollo está determinado por la integral mostrada en la ecuación (2.11), que define el crecimiento de la avalancha.

$$\exp \left[ \int_0^{d_{crit}} (\alpha - \eta) dx \right] \quad (2.11)$$

Donde  $\alpha$  y  $\eta$  son el primer coeficiente de Townsend y el coeficiente de captura, respectivamente,  $d_{crit}$  la distancia desde la superficie del conductor para la cual  $\alpha = \eta$ . [8]

## 2.7 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El método de los elementos finitos (MEF), es un elemento de cálculo para resolver numéricamente problemas planteados mediante ecuaciones diferenciales.

En el método se propone que un número infinito de variables desconocidas se conviertan en un número limitado de variables, al subdividirlo en elementos que obtienen su forma y espaciamiento con base al problema a solucionar.

Para resolver problemas electrostáticos, se utiliza este método en el cual el volumen de interés es discretizado en elementos individuales y el potencial aplicado dentro cada sub-volumen es aproximado por una función relativamente simple. Así se desarrolla un conjunto de ecuaciones de elementos que forman un sistema lineal de ecuaciones (un sistema matricial), el cual cuando incrementa el número de variables dentro del sistema matricial, por un conjunto de condiciones de límite, es solucionado para los potenciales y campos eléctricos desconocidos. [11]

En la Figura 2.6, se observa la desratización mediante elementos triangulares en un conductor dentro de una jaula corona, este método se utiliza en este trabajo para encontrar el potencial y campo eléctrico.

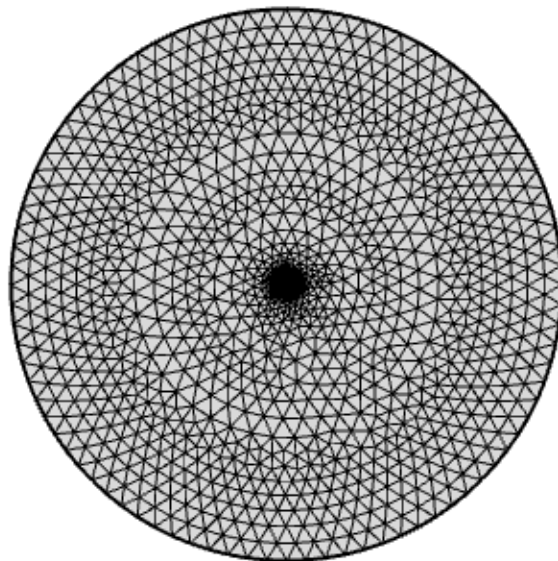


Figura 2.6 Visualización de una simulación MEF de una jaula corona.



### 2.7.1 Ecuación de Laplace para campos electrostáticos

La ecuación de Laplace (ecuación 2.12) permite resolver problemas electrostáticos, que es el tipo de problemas que se resuelve en este trabajo, para determinar la distribución del campo eléctrico. Adicionalmente, para determinar la intensidad de campo eléctrico una vez conocida la distribución de la tensión, este se calcula con la ecuación 2.13. Estas ecuaciones tienen soluciones analíticas conocidas para ciertos arreglos geométricos. Sin embargo, para geometrías generales no es fácil obtener una solución analítica y recurriremos a métodos numéricos para la solución, como es el caso del método del elemento finito [7].

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.12)$$

$$E = \nabla V \quad (2.13)$$

## 2.8 JAULA CORONA

Para entender los efectos de la descarga corona, los estudios de laboratorio han utilizado una gran variedad de arreglos geométricos como el punta-plano, esfera-plana, esférica-concéntrica, etc. [1]

La jaula corona consiste en un conductor de prueba colocado en el centro de un cilindro teniendo un radio mucho mayor que el conductor de prueba; dicho cilindro puede estar hecho de una placa metálica delgada, pero comúnmente está fabricada de una malla metálica [1], como se puede observar en la Figura 2.7. Su función principal es la de reproducir la distribución del campo eléctrico en la región bajo investigación similar a la que se tendría en un conductor de una línea de transmisión. [3]

Aplicando suficiente tensión entre el conductor y la jaula, se genera un alto campo eléctrico en la superficie del conductor. La alta tensión es aplicada sobre el conductor, mientras que la jaula es mantenida a potencial eléctrico cero por medio de una conexión directa a tierra o a un potencial cercano a cero por una conexión a tierra a través de una impedancia de medición [1].

En jaulas de longitud finita, la distribución de campo eléctrico en la dirección longitudinal es uniforme en la sección central del conductor y comienza a ser no uniforme hacia ambos extremos. Añadiendo una sección de guarda en ambos extremos, la sección central de la jaula es seleccionada para obtener uniformidad de la distribución del campo eléctrico a lo largo de la longitud del conductor [1]. Para reducir la descarga de borde en la superficie del conductor, se coloca un anillo equipotencial en ambos extremos del conductor [10].

El criterio principal para el diseño de una jaula corona, es tener un margen adecuado entre la tensión de ruptura y la tensión de inicio de la descarga corona. Un margen de al menos 50% entre estas dos tensiones, permite realizar estudios a diferentes conductores o arreglos de conductores. Para ello, el diámetro de la jaula debe ser lo suficientemente pequeño para obtener la tensión de inicio de la descarga corona a una tensión lo suficientemente baja [1]

La jaula corona es una herramienta esencial para el estudio de la descarga corona, que ocurre en los conductores de las líneas de transmisión, dentro de un laboratorio. Al realizarse de esta manera la jaula corona presenta algunas ventajas, como:

- Un espacio de prueba reducido.
- Bajo costo de inversión.
- Condiciones de prueba controladas.
- Periodo corto de prueba.
- Estructura ajustable.



Figura 2.7 Jaula Corona [10]

## CAPÍTULO 3

# MODELO PARA EL CÁLCULO DE LA TENSIÓN DE INICIO DE LA DESCARGA CORONA

### 3.1 TENSIÓN DE INICIO DE LA DESCARGA CORONA

Al diseñar una línea de alta tensión, es importante buscar reducir la posibilidad de la presencia del efecto corona. Por esto, es importante predecir las condiciones en las que inicia dicho efecto.

Con datos experimentales se definió una constante "K", la cual representa la evaluación de la integral del criterio de inicialización de descarga corona, presentada anteriormente por la ecuación (2.10), quedando de la siguiente manera [8] manera (ecuación 3.1):

$$K = \exp \left[ \int_0^{d_{crit}} (\alpha - \eta) dx \right] \quad (3.1)$$

Los valores para el coeficiente de Townsend ( $\alpha$ ) y el coeficiente de captura ( $\eta$ ) son evaluadas por las siguientes expresiones [8]:

El coeficiente de ionización está definido por dos posibles igualdades dependiendo del valor de la relación  $\frac{\delta}{E}$ :

$$\frac{\alpha}{\delta} = \begin{cases} 3632 \exp \left( -168.0 \frac{\delta}{E} \right) & 1.9 < \frac{\delta}{E} < 45.6 \\ 7385 \exp \left( -200.8 \frac{\delta}{E} \right) & 45.6 < \frac{\delta}{E} < 182.4 \end{cases} \quad (3.2)$$

Mientras que para el coeficiente de captura se tiene la ecuación (3.3):

$$\frac{\eta}{\delta} = 9.9865 - 0.541 \times 10^{-3} \left( \frac{\delta}{E} \right) + 1.118 \times 10^{-8} \left( \frac{\delta}{E} \right)^2 \quad (3.3)$$

Como se observa, ambos coeficientes son afectados por la densidad relativa del aire “ $\delta$ ”, la cual está definida por la ecuación (3.4):

$$\delta = \frac{P}{101.3 \times 10^3} \frac{293}{293+T} \quad (3.4)$$

Siendo P la presión en pascales y T la temperatura en °C.

El mejor valor que se puede obtener de la constante “K” para el inicio de la descarga corona es el de 3500. Por lo tanto, cuando la ecuación (3.1):

$$K = \exp \left[ \int_0^{d_{crit}} (\alpha - \eta) dx \right] = 3500 \quad (3.5)$$

se obtiene la condición de inicio de la descarga corona. [8]

### 3.2 METODOLOGÍA DE PROGRAMACIÓN

Para la realización de este proyecto se trabajó con el software COMSOL Multiphysics, en el cual se programaron las ecuaciones (3.1) a la (3.3).

Para facilitar el cálculo, teniendo en cuenta el valor experimental “K”=3500, que es obtenido del exponencial del criterio de inicialización de la descarga corona, se despeja aplicando logaritmos naturales; de esta manera no es necesario aplicar el exponencial, lo que se desea obtener es el valor absoluto de la integral. Así de la ecuación (3.1):

$$K = \exp \left[ \int_0^{d_{crit}} (\alpha - \eta) dx \right] \quad (3.1)$$

Aplicando logaritmos naturales en ambos lados de la igualdad se obtiene la ecuación (3.6):

$$\ln K = \ln \exp \left[ \int_0^{d_{crit}} (\alpha - \eta) dx \right] \quad (3.6)$$

Siguiendo las leyes de los logaritmos, al multiplicar un logaritmo natural por el exponencial se obtiene la unidad, quedando la ecuación como se muestra en la ecuación (3.7):

$$\ln k = \int_0^{d_{crit}} (\alpha - \eta) dx \quad (3.7)$$

En la ecuación (3.8), se sustituye el valor de la mejor aproximación de la constante “K”, quedando de la siguiente manera:

$$\ln 3500 = \int_0^{d_{crit}} (\alpha - \eta) dx \quad (3.8)$$

Por último, se aplica el logaritmo natural de 3500 (valor de “K”) (ver ecuación 3.9), obteniendo así, la igualdad buscada en el programa desarrollado en COMSOL Multiphysics

$$8.16051 = \int_0^{d_{crit}} (\alpha - \eta) dx \quad (3.9)$$

### 3.2.1 Diagrama de flujo

A continuación, se presenta el diagrama de flujo que describe el proceso de la programación que se llevó a cabo en el software COMSOL Multiphysics para realizar el método de cálculo que permite determinar la tensión de inicio de la descarga corona.

Posteriormente se realiza la descripción detallada de cada paso expuesto en el diagrama de flujo para tener una mejor comprensión del mismo.

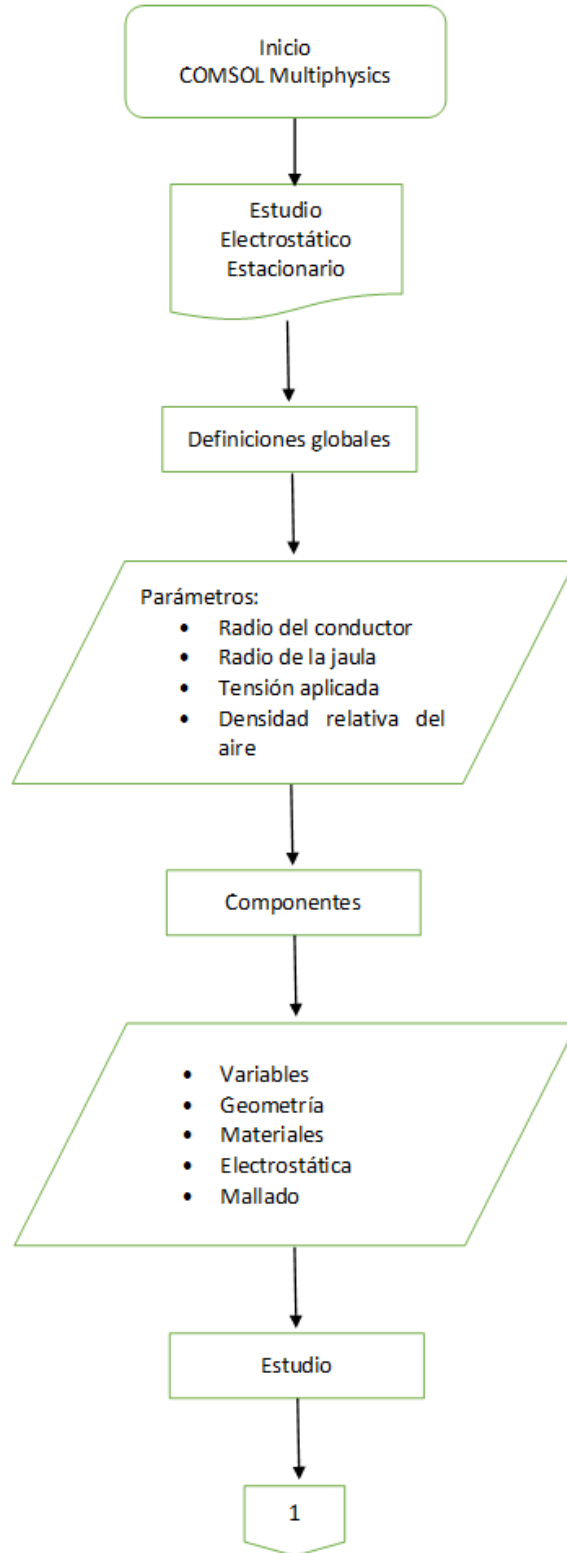


Figura 3.1 Diagrama de flujo del método de cálculo.

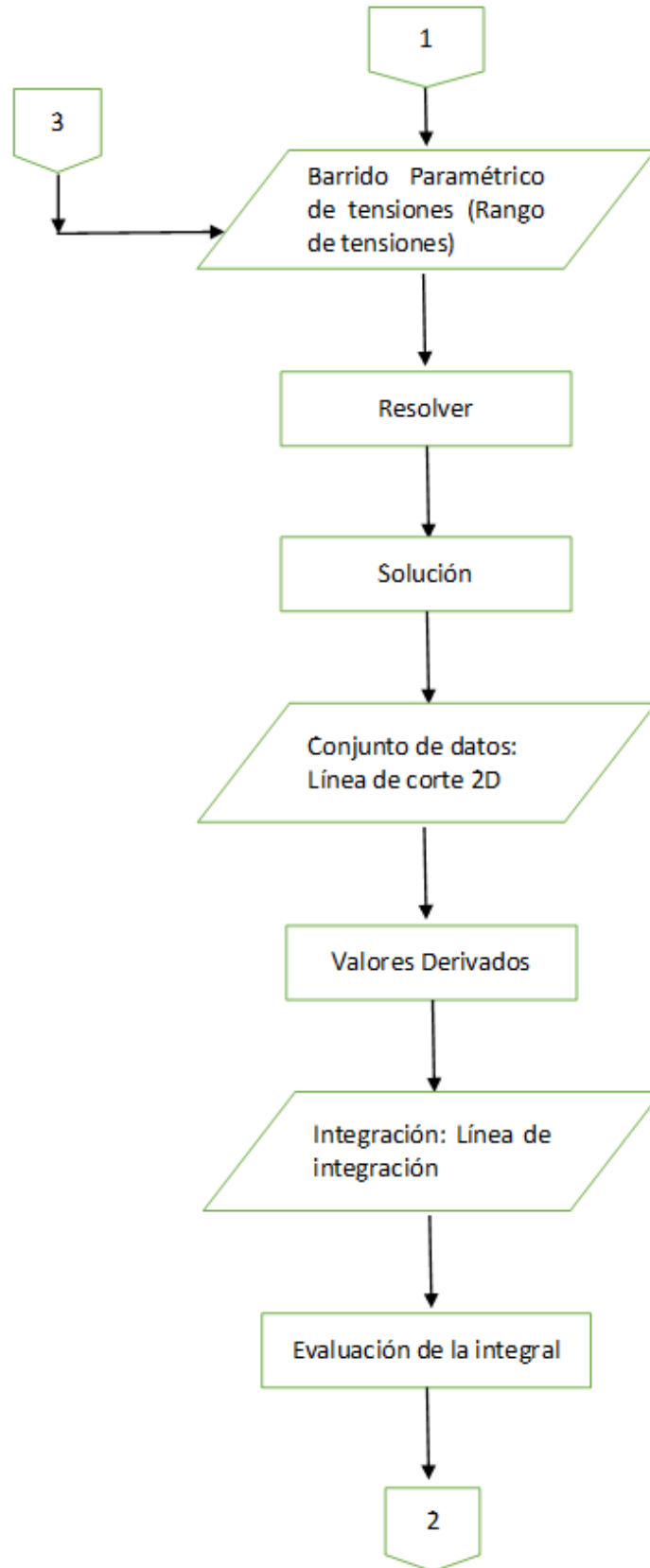


Fig. 3.1 Diagrama de flujo del método de cálculo (continuación).

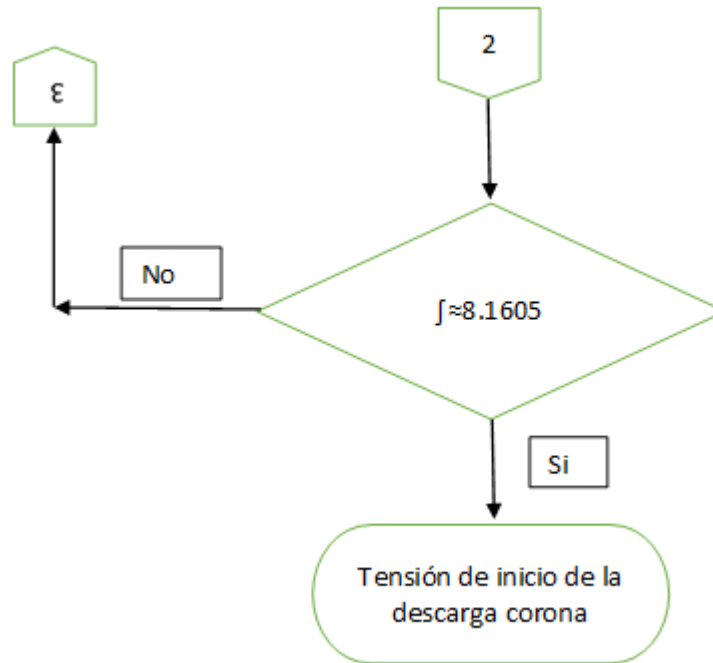


Fig. 3.1 Diagrama de flujo del método de cálculo (continuación).

Se realiza un estudio electrostático estacionario en el cual se definen parámetros y variables, así como la geometría a utilizar, definiendo los materiales y los niveles de tensión aplicados. En el presente trabajo se realizan los modelos correspondientes a una jaula corona cilíndrica, éstos se realizan en geometrías de dos y de tres dimensiones.

### 3.2.1.1 Definición de los parámetros del arreglo

Para realizar la simulación es necesario primero definir ciertos parámetros, los cuales funcionan como definiciones globales, dicho de otra forma, serán valores que se pueden utilizar en cualquier parte de la simulación.

Se comienza por definir los parámetros a utilizar como lo son:

- Radio de la jaula corona.
- Radio del conductor que se desea estudiar.
- Tensión inicial que suministra la fuente al conductor.
- La densidad relativa del aire del lugar en el que se realiza el estudio.

En la Figura 3.2 se presenta la manera de introducir los parámetros en el software COMSOL Multiphysics.



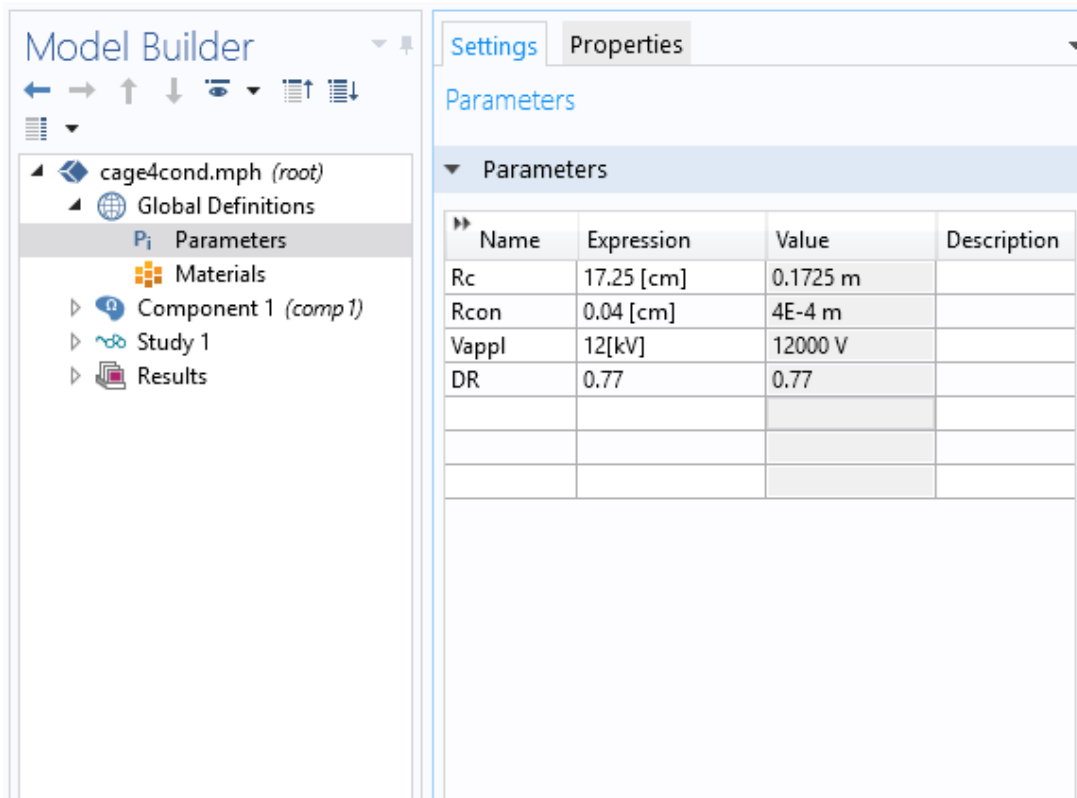


Figura 3.2 Definición de parámetros.

### 3.2.1.2 Definición de las variables para la simulación

Una variable es un dato que puede obtener cualquier valor dado por una función, siguiendo esta definición, es necesario declarar las variables correspondientes al estudio de la tensión de inicio del efecto corona.

Para la programación del estudio es necesario considerar alfa ( $\alpha$ ) y eta ( $\eta$ ). Como se observa en la ecuación (3.2), alfa puede estar definida por dos ecuaciones, cuando es menor que 45.6 y cuando es mayor que 45.6; para esto es necesario utilizar una sentencia de condición (if). Para eta, la ecuación que la define se transcribe teniendo en cuenta los parámetros que la describen. Una variable importante dentro de la metodología es el coeficiente de ionización efectivo ( $\alpha\eta$ ), ya que éste es el que define la integral (Fig. 3.3).

A continuación, es necesario declarar la variable de la distancia crítica la cual es el segmento de línea a integrar; a su vez es necesario declarar otra variable que es el punto que delimita la distancia (límite superior). Estas variables son evaluadas a lo largo de una línea de medición que se establece desde el punto de mayor campo eléctrico en la superficie del conductor hasta el cilindro aterrizado, con una dirección radial.

Variables	
Name	Expression
alfaeff2	$\text{abs}(\text{alfa2}-\text{eta})$
alfaeff	$\text{alfa2}-\text{eta}$
eta	$\text{DR} \cdot 9.9865 - 0.541 \cdot 10^{-3} \cdot (\text{abs}(\text{es.normE}) / (\text{DR} \cdot 100)) + 1.118 \cdot 10^{-8} \cdot (\text{abs}(\text{es.normE}) / (\text{DR} \cdot 100))^2$
alfa2	$\text{if}((\text{es.normE} / \text{DR}) < 45.6, 3632 \cdot \exp(-168.0 \cdot (100 \cdot \text{DR} / \text{abs}(\text{es.normE}))) \cdot \text{DR}, 7385 \cdot \exp(-200.8 \cdot (100 \cdot \text{DR} / \text{abs}(\text{es.normE}))) \cdot \text{DR})$
xcrit	$\text{if}(\text{alfaeff2} > \text{AFmin}, 0, (x) \cdot 100)$
dcrit0	$\text{if}(\text{alfaeff2} > \text{AFmin}, 0, (x - \text{Rcon}) \cdot 100)$

Figura 3.3 Variables.

Con el fin de facilitar la solución, se colocan “sondas de prueba” en este caso serán tres:

1. Dist: Es la distancia máxima a la cual se va a tomar el punto de integración. Como se observa en la Figura 3.4, esta sonda solo tiene el valor de un punto

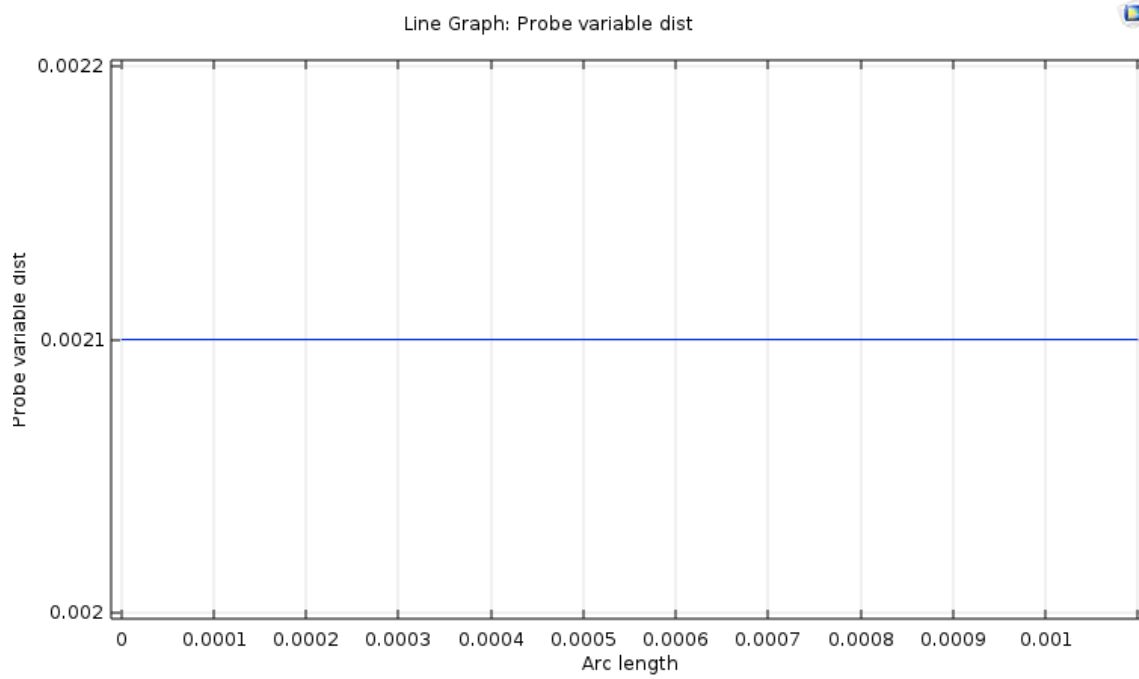


Figura 3.4 Gráfica sonda de prueba “Dist”.

2. AFmin: Esta sonda sirve para asignar el valor mínimo del resultado del coeficiente de ionización efectivo.

Esto debido a que el valor que se busca es cuando  $\alpha$  es igual a  $\eta$ , es decir cuando su diferencia es cero o muy cercana a cero. En la Figura 3.4 se muestran las gráficas correspondientes a  $\alpha$  (de color azul) y  $\eta$  (de color verde). El punto donde éstas se interceptan es la igualdad deseada.

Para tener una mejor apreciación de esta igualdad se crea una variable correspondiente al coeficiente de ionización efectivo ( $\alpha' = \alpha - \eta$ ), definida como  $\alpha_{\text{eff}}$ . En la Figura 3.5 se observa la gráfica correspondiente al valor de esta variable, de igual modo no se obtiene un valor certero del cruce por cero; por lo cual es necesario tomar el valor absoluto de esta expresión, definido como la variable  $\alpha_{\text{eff}2}$ , lo cual permitirá localizarlo como un mínimo, la gráfica de esta variable se muestra en la Figura 3.6.

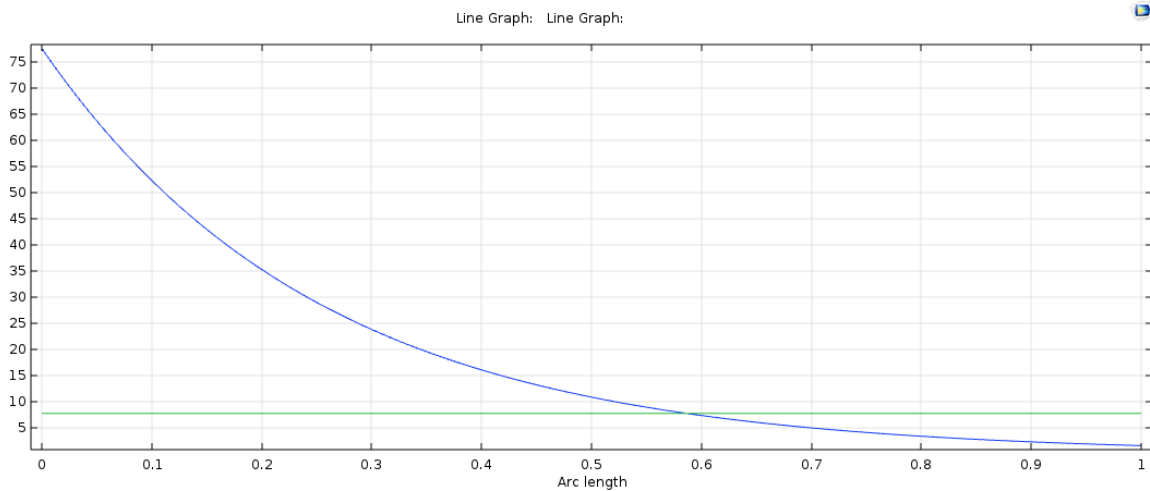


Figura 3.5 Gráfica comparativa de Alfa v.s. Eta

Mediante la sonda de prueba AFmin se obtiene el valor mínimo de  $\alpha_{\text{eff}2}$ . Para encontrar la coordenada donde se tiene el valor de AFmin, mediante la variable Xcrit a todos los valores mayores a AFmin a lo largo de la trayectoria de la línea de medición se les asigna un valor de cero y al punto donde se tiene el valor AFmin se le asigna el valor de la coordenada en x, la gráfica de esta variable se presenta en la Figura 3.7.

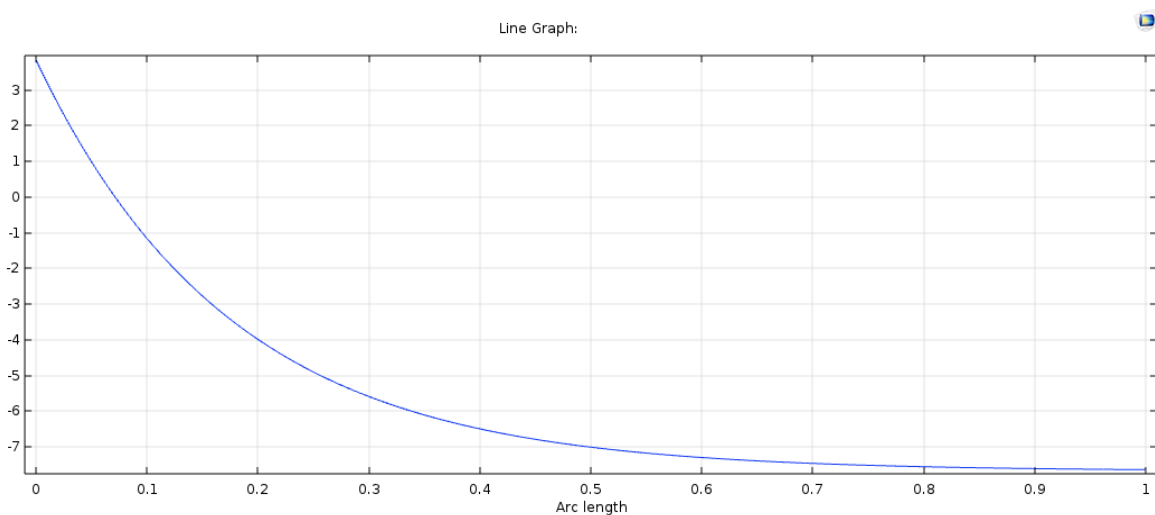


Figura 3.6 Alfa-eta

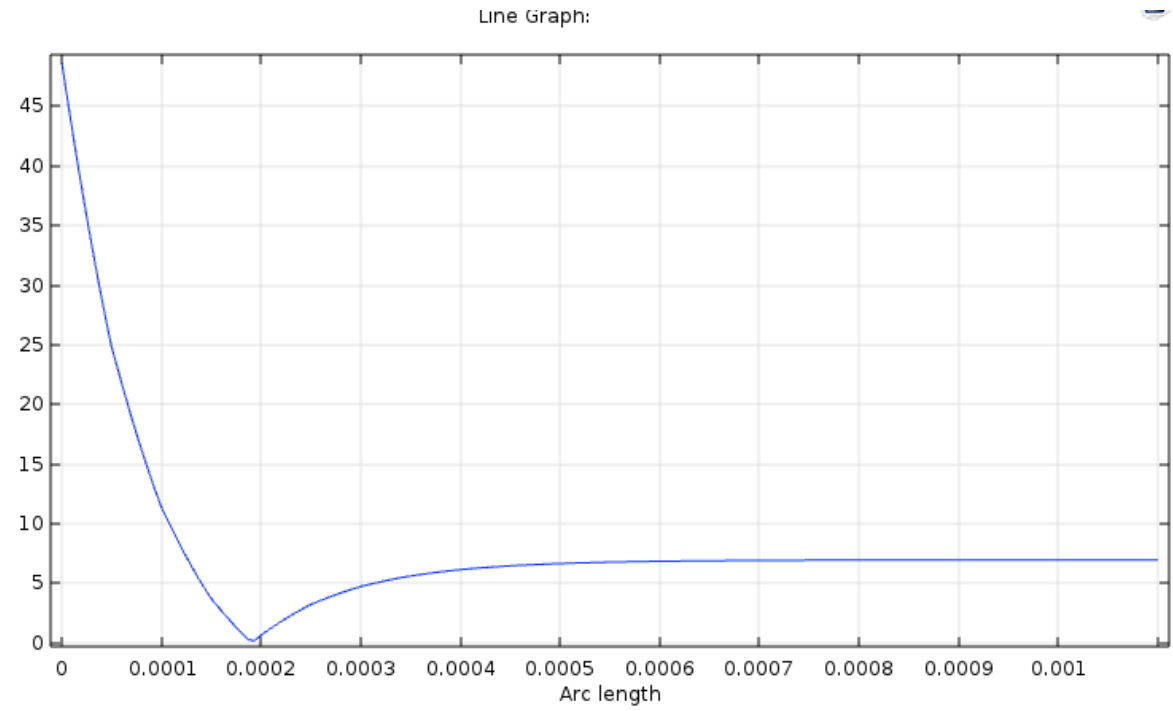


Figura 3.7 Gráfica de la variable "alfaeff2"

Xcritica: Es la coordenada sobre una línea de medición donde se alcanza la distancia crítica ( $\alpha' = 0$ ) desde la superficie del conductor. Este valor se obtiene con la sonda Xcritica, la cual extrae el valor máximo que exista en la variable Xcrit, como se observa en la Figura 3.8.

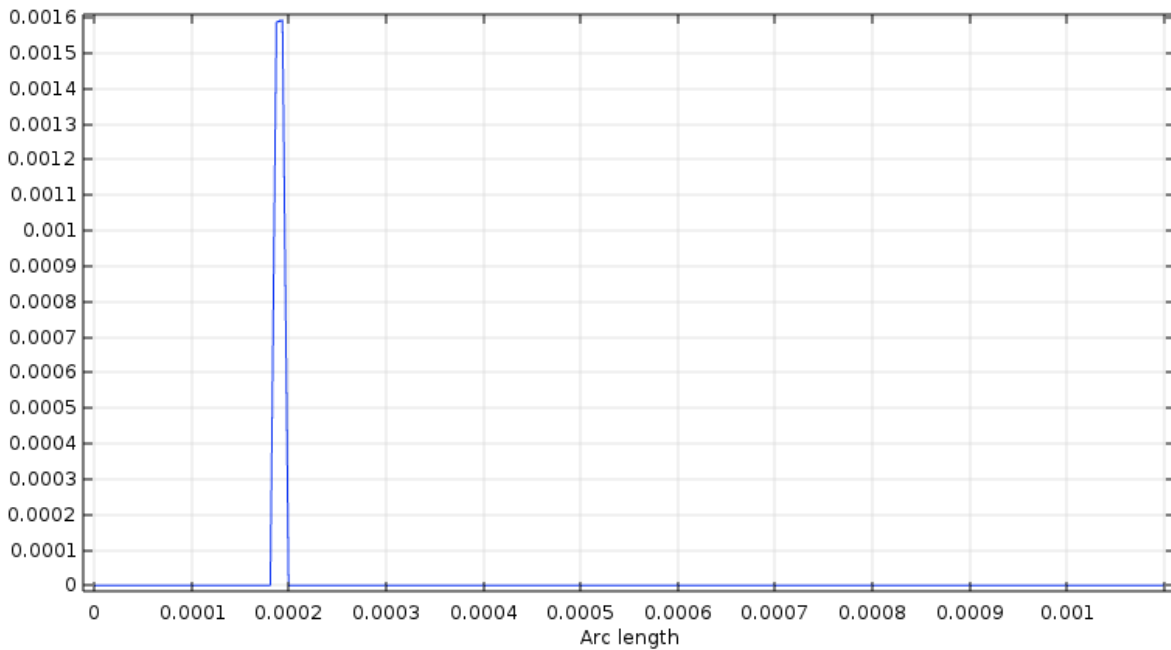


Figura 3.8 Gráfica de variable "Xcrit"

### 3.2.1.3 Geometría

Dentro de los componentes es necesario definir la geometría (arreglo) del cual se quiere realizar el estudio del efecto corona. Es aquí donde se utilizan los parámetros de los radios previamente asignados. Para el conductor se utiliza el radio más pequeño, mientras que el radio mayor será el radio de la jaula.

Así mismo, en esta sección se crea un segmento de línea, que será utilizado para realizar la medición y solución de la integral; éste se crea desde la superficie del conductor hasta alcanzar el radio de la jaula o una distancia propuesta, con una dirección radial.

Para la facilitar la implementación del método, dicho segmento de línea se propone en el eje "x", ya que las variables son asignadas en este eje. En la Figura 3.9 se ilustra la geometría del estudio.

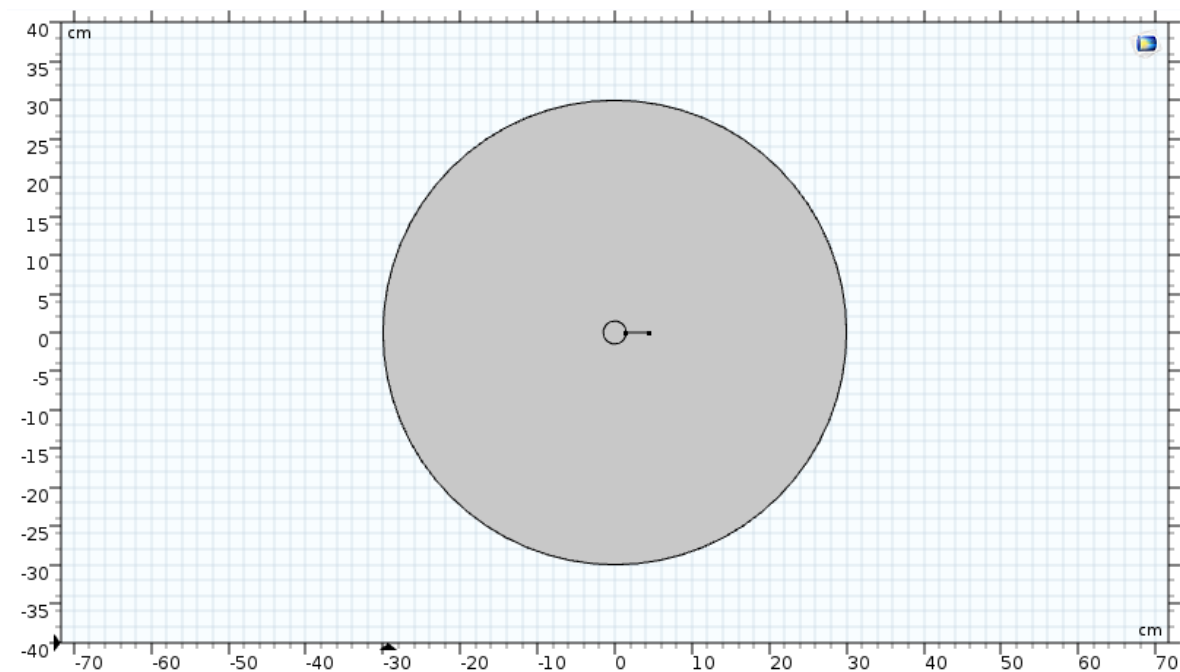


Figura 3.9 Geometría de la jaula corona.

### 3.2.1.4 Materiales

El aire es el elemento utilizado como medio aislante, por lo tanto, de la librería de materiales se selecciona el material "aire". Se debe considerar que el material del conductor no es relevante, esto debido a que el potencial está definido en sus fronteras y el campo eléctrico al interior del conductor es cero, así que el material tanto de la jaula como del conductor es el mismo, como se aprecia en la Figura 3.10.

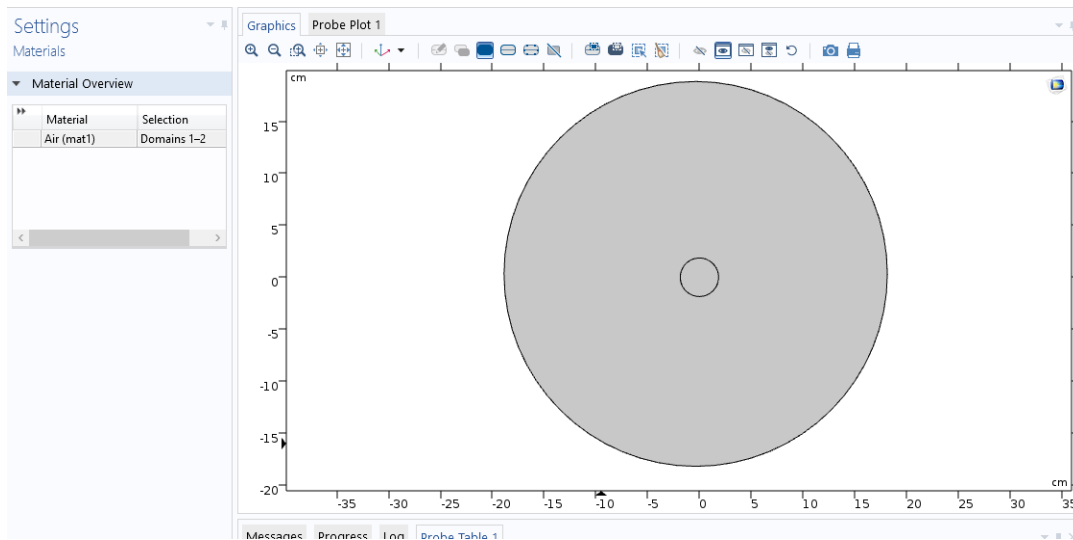


Figura 3.10 Materiales: Aire en todos los dominios.

### 3.2.1.5 Estudio electrostático

El estudio electrostático es usado para soluciones del campo eléctrico, su desplazamiento y la distribución del potencial en aislantes bajo condiciones donde la distribución de la carga eléctrica es explícitamente prescrita.

En la Figura 3.11 se observa la selección del conductor (radio inferior) bajo potencial aplicado, mientras que en la Figura 3.12 los bordes de la “jaula” (radio mayor) son puestos a tierra.

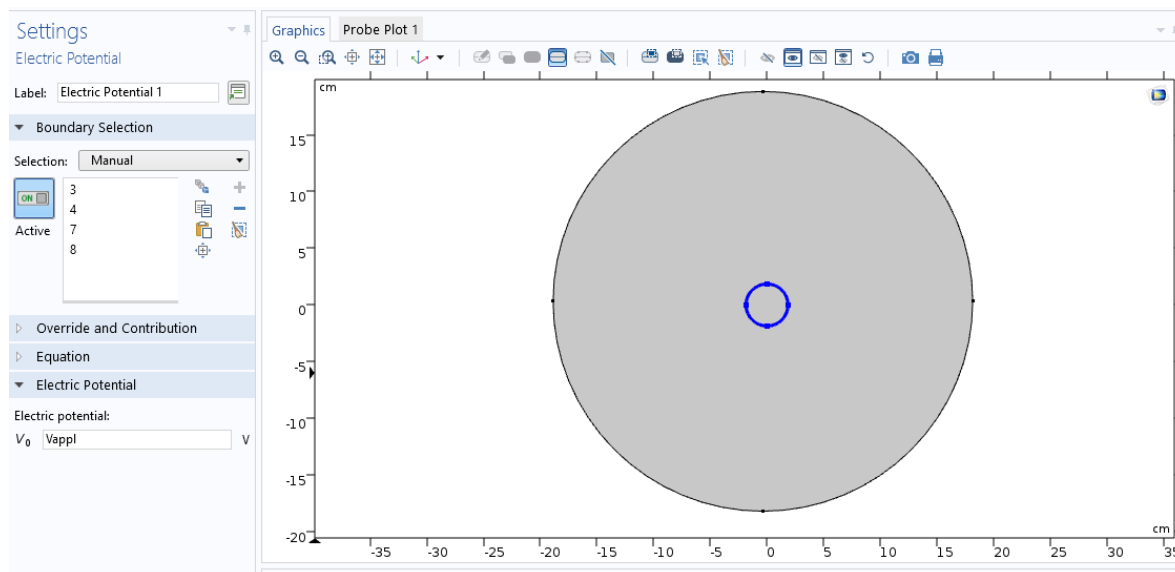


Figura 3.11 Superficie del conductor puesto bajo potencial eléctrico.

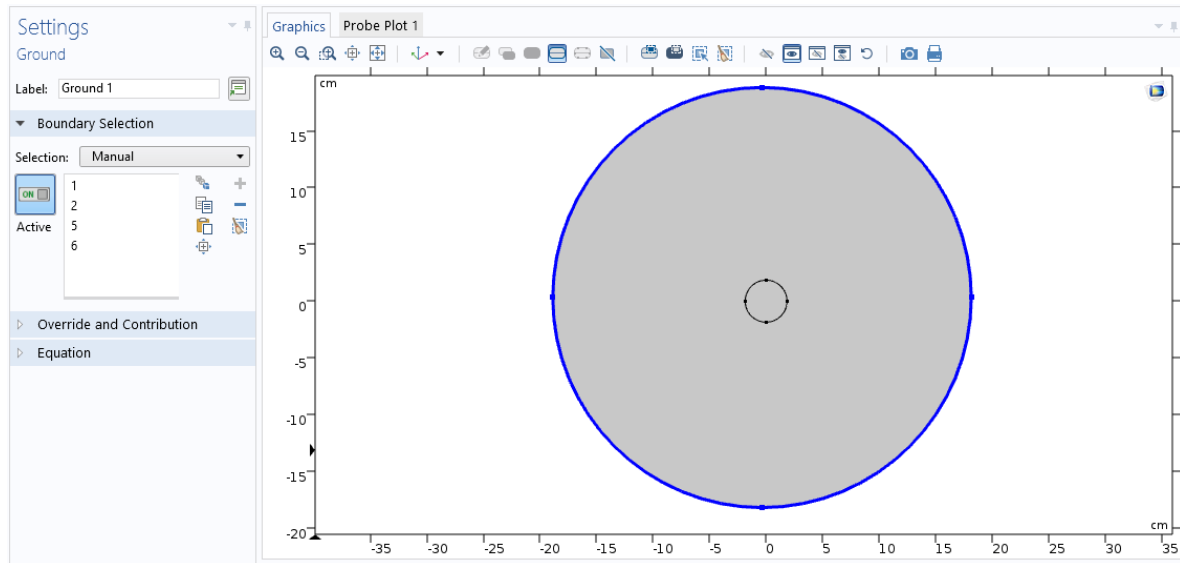


Figura 3.12 Superficie de la jaula corona referenciada a tierra.

### 3.2.1.6 Mallado

Debido a que se utiliza el método de elemento finito para obtener soluciones numéricas aproximadas, se crea un mallado (Figura 3.13) para la medición, el cual se hará más denso en el lugar del segmento de línea de medición (ver Figura 3.14), debido a que se necesita mayor precisión en esa distancia.

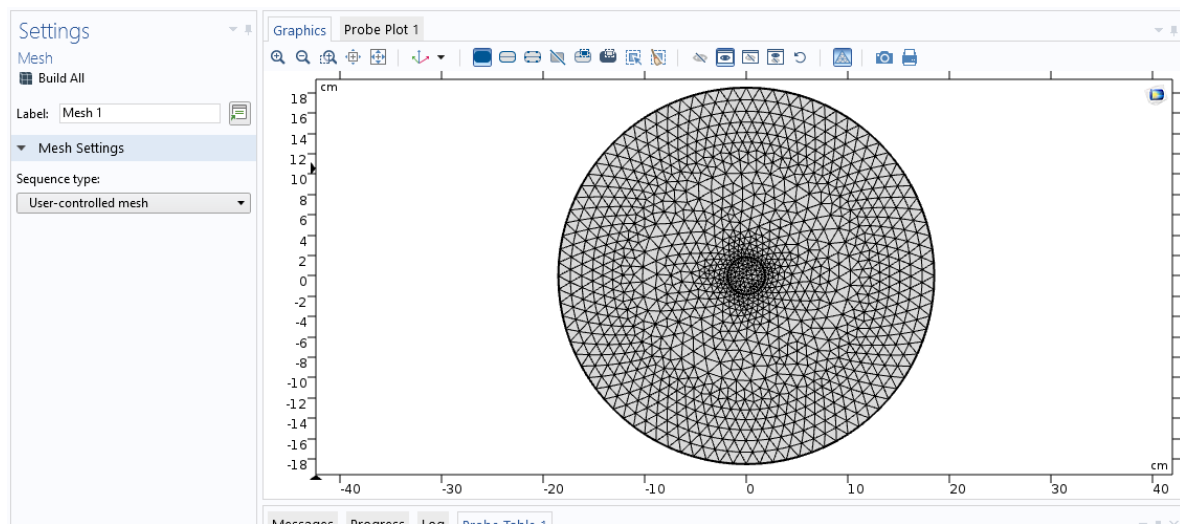


Figura 3.13 Mallado de la jaula corona.

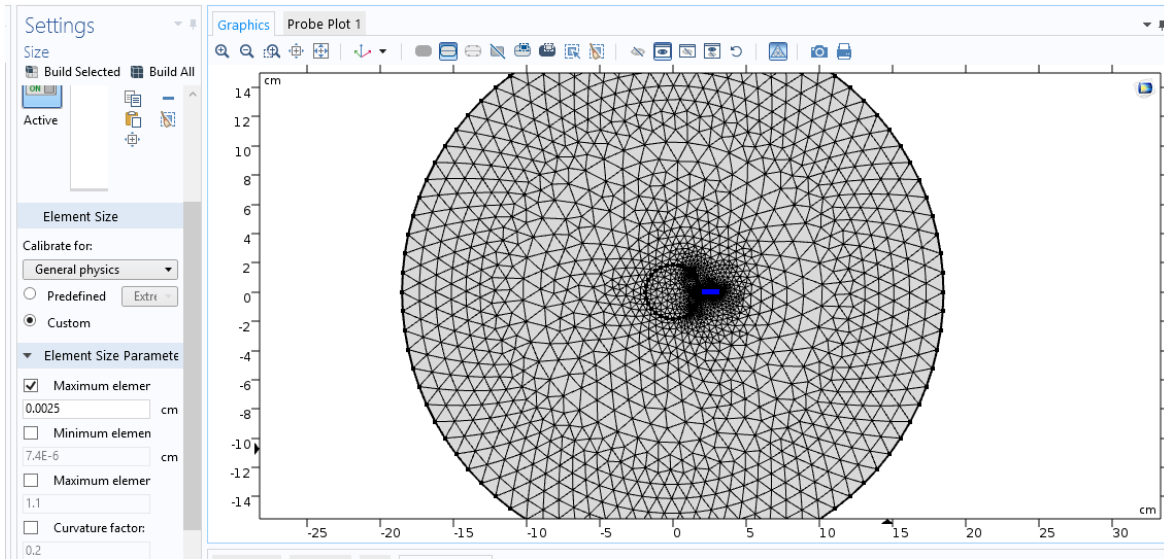


Figura 3.14 Mallado mucho más denso en el segmento de línea.

### 3.2.1.7 Estudio

Dentro del estudio se crea un barrido paramétrico, esto permite crear diferentes escenarios de tensiones dentro de una misma simulación. Con ello se reduce el tiempo de cálculo para encontrar la tensión de inicio del efecto corona.

### 3.2.1.8 Solución

La primera solución arrojada es una gráfica del modelo, en la cual se muestra la distribución del campo eléctrico en función de la tensión aplicada. (Figura 3.15).

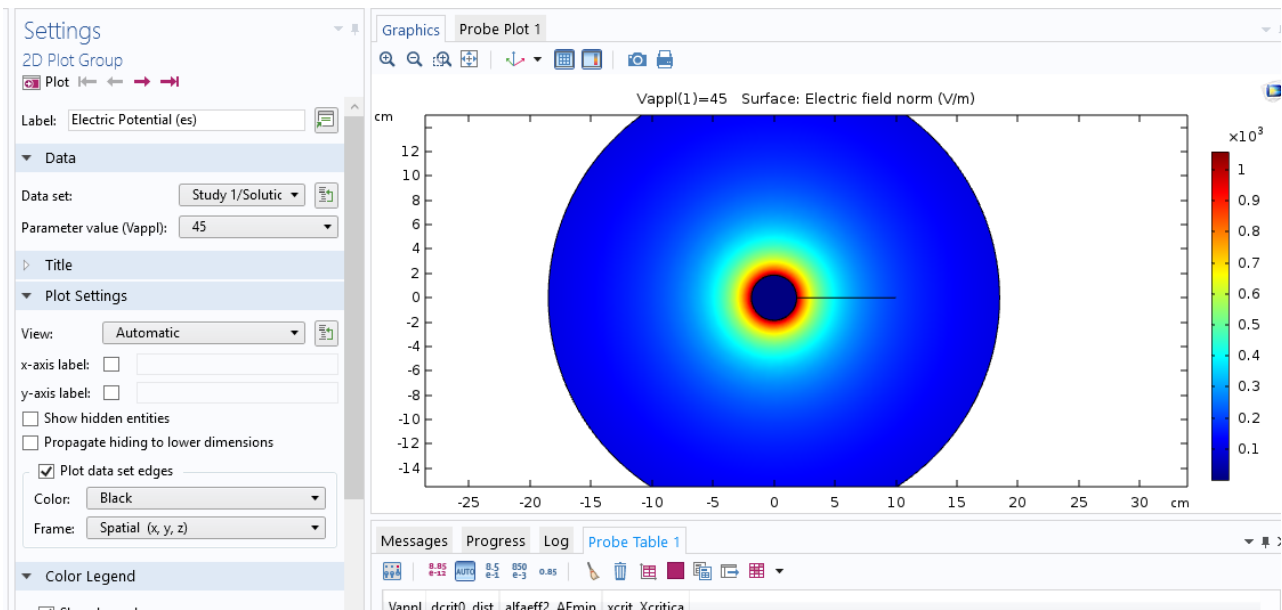


Figura 3.15 Solución del modelo de la jaula corona.



En los ajustes de datos, se creó una línea de corte en 2D (Figura 3.16) la cual representa los límites para la integral desde la superficie del conductor hasta la distancia crítica.

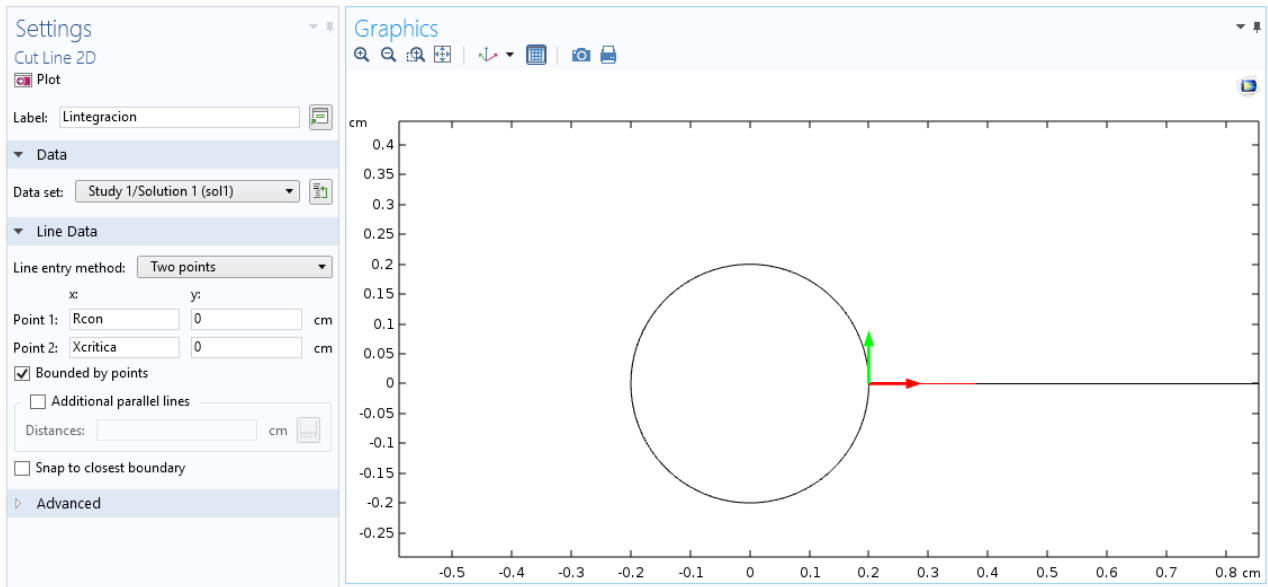


Figura 3.16 Configuración de la línea de integración.

Como siguiente paso, se utiliza una integración simple, en la cual se integran los valores del coeficiente de ionización efectivo (variable  $\alpha_{\text{eff}}$ ), creando así la solución de la ecuación 3.9 para diferentes valores de tensión.

En la Figura 3.17 se muestra la tabulación de datos arrojada por el programa al solucionar la integral para cada valor de tensión del barrido paramétrico.

La solución de la integral debe ser aproximada a un valor de 8.1605, teniendo de esta manera la tensión de inicio de la descarga corona.

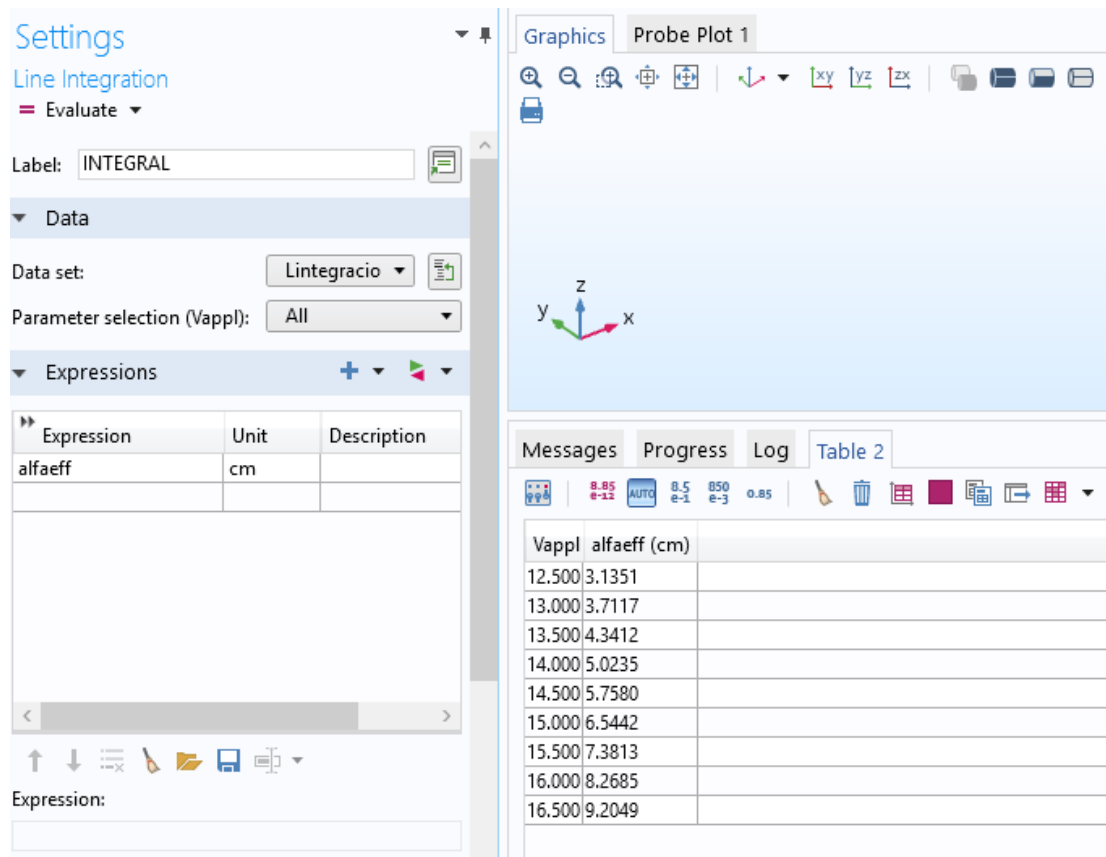


Figura 3.17 Evaluación de la integral.

Si dentro de las soluciones obtenidas, el valor de la integral buscado (8.1605) se encuentra entre dos rangos de tensiones, se debe realizar otro barrido paramétrico con estas dos tensiones como rangos (inferior y superior respectivamente) a fin de aproximar una mejor solución.

Por otro lado, si la integral no se puede solucionar o los valores de ésta son negativos o menores de 8.1605 es debido a que los valores de tensión son insuficientes para crear un campo eléctrico lo suficientemente grande para generar la descarga corona, esto refiere a aumentar los rangos de tensión en el barrido paramétrico.

### 3.3 SIMULACIÓN DE DIFERENTES ARREGLOS DE CONDUCTORES

Las simulaciones realizadas en COMSOL Multiphysics, se llevan a cabo con el método del cálculo propuesto anteriormente; aplicándose para diferentes arreglos de conductores (uno, dos y cuatro conductores), posicionándolos a diferentes distancias. Comparando los niveles de tensión del inicio de la descarga corona y campo eléctrico para cada conjunto de arreglos.

Se simulan dos condiciones de densidad relativa del aire, tomando un valor para la ciudad de México de 0.77 y otro valor equivalente a 1 para una altura a nivel del mar, referenciando este valor a los resultados obtenidos para algunos arreglos en la ciudad de Estambul Turquía. A su vez, se comparan los resultados obtenidos por el modelo en COMSOL con un artículo de referencia.

### 3.3.1 Arreglo de un conductor

En la Figura 3.18 se muestra la distribución del campo para el arreglo de un solo conductor, con una densidad relativa del aire de 0.77 y un radio de 0.0004 [m], obteniendo un valor de la integral del coeficiente efectivo de ionización de 8.1596 el cual es equivalente a un valor  $K= 3496.7866$  obteniendo así la condición de inicio de la descarga corona.

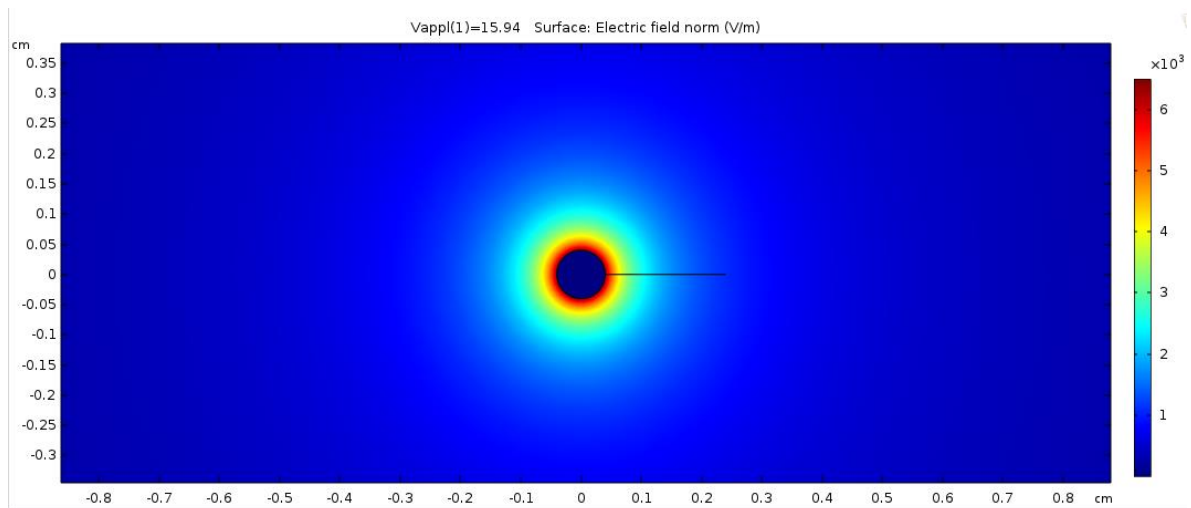


Figura 3.18 Arreglo de un conductor.

En la Tabla 3.1 se muestran los valores obtenidos de la simulación para el arreglo de un conductor en la cual se muestran los valores a los que inicia la descarga corona, así como el valor de la integral obtenido. Teniendo tres simulaciones, en la cuales se varía el radio de la jaula y la densidad relativa del aire de acuerdo a las geometrías utilizadas en la parte experimental en la Ciudad de México como las utilizadas en Estambul.

**Tabla 3.1 Resultados obtenidos en la simulación para el arreglo de un conductor.**

Radio de la Jaula [m]	Radio del conductor [m]	Densidad relativa del aire	Tensión de inicio [kV]	Campo eléctrico [V/m]	Valor de la integral	Valor de la constante "K"
0.185	0.0004	0.77	15.94	6500	8.1596	3496.78
0.185	0.0004	1	19.27	7850	8.1603	3499.23
0.3	0.0020	0.77	44.43	4430	8.1599	3497.83

**Tabla 3.2 Comparación de resultados para el arreglo de un conductor.**

Radio de la jaula [m]	Densidad relativa del aire	Tensión de inicio [kV]	
		Modelo en COMSOL	Artículo de referencia [14]
0.185	0.77	15.94	15.2
0.30	0.77	44.43	

### 3.3.2 Arreglo en haz de dos conductores

Para el arreglo de dos conductores se usaron diferentes distancias con relación al centro de la jaula corona como se muestra en las Figuras 3.19 y 3.20, observando que la distribución de campo eléctrico y la tensión de inicio de la descarga corona, varían de acuerdo a la separación entre conductores.

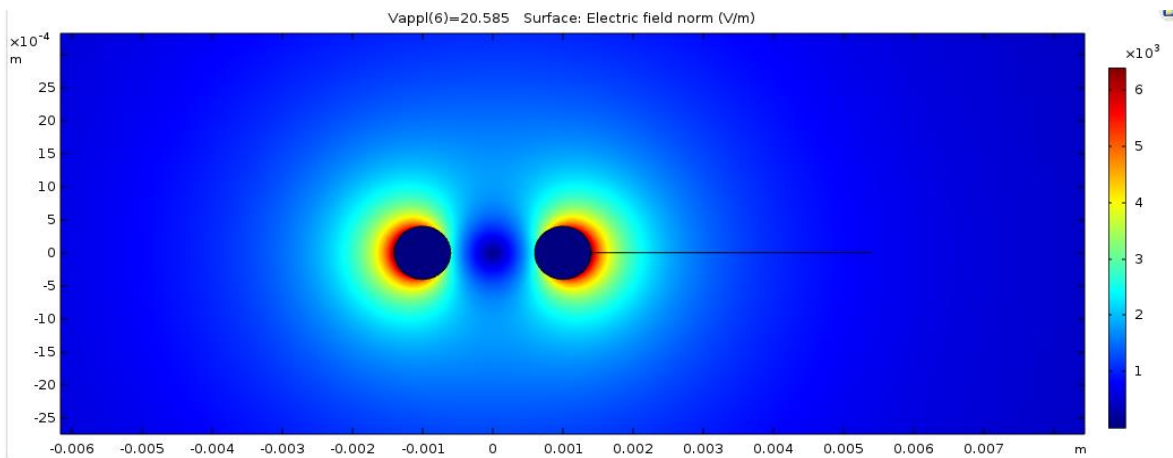


Figura 3.19 Arreglo en haz de dos conductores con una distancia de 0.001 [m] al centro de la jaula corona.

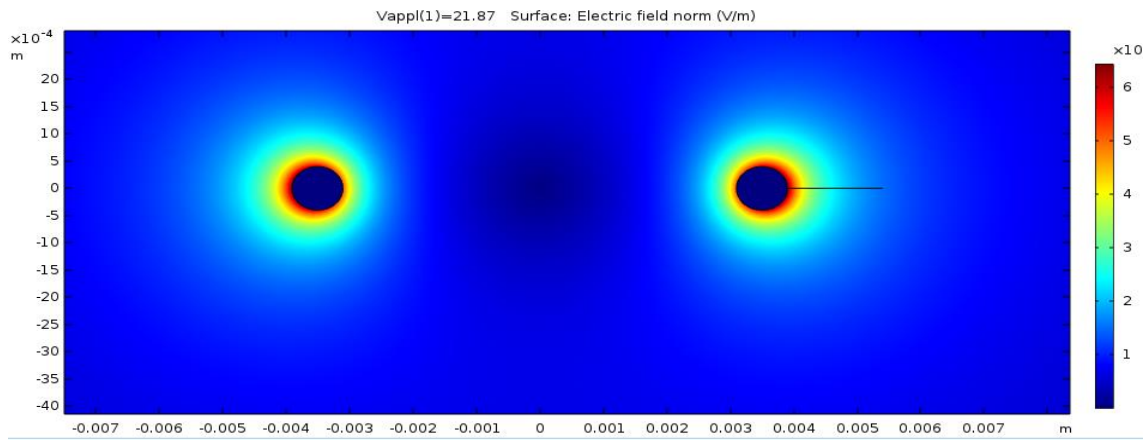


Figura 3.20 Arreglo en haz de dos conductores con una distancia de 0.0035 [m] al centro de la jaula corona.

Se simulan ocho arreglos de conductores diferentes (algunos con la misma separación entre conductores, pero diferente densidad relativa del aire o diferente radio de la jaula corona). Los resultados obtenidos de estas simulaciones se presentan en la Tabla 3.3. Los casos con densidad relativa igual a 1, corresponden a arreglos utilizados en Estambul.

Tabla 3.3 Resultados obtenidos de la simulación para el arreglo de dos conductores.

Radio de la Jaula [m]	Radio del conductor [m]	Densidad relativa del aire	Distancia de los conductores al centro [m]	Tensión de inicio [kV]	Campo eléctrico [V/m]	Valor de la integral	Valor de la constante "K"
0.185	0.0004	0.77	0.001	20.585	6400	8.1606	3500.28
0.185	0.0004	0.77	0.0035	21.876	6400	8.1606	3500.28
0.185	0.0004	0.77	0.005	21.698	6450	8.1612	3502.38
0.185	0.0004	0.77	0.01	20.823	6500	8.1601	3498.53
0.300	0.0020	1	0.01	71.256	5455	8.1602	3498.88
0.185	0.0004	0.77	0.015	20.085	6500	8.1604	3499.898
0.185	0.0004	0.77	0.026	18.918	6500	8.1604	3499.898
0.185	0.0004	0.77	0.04	17.915	6470	8.1610	3501.68

De las simulaciones realizadas para el arreglo en haz de dos conductores, se seleccionan aquellas que pueden ser comparadas con las simulaciones en Estambul, Turquía; y el artículo de referencia. Esta comparación se manifiesta en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Comparación de resultados para el arreglo de dos conductores.**

Distancia de los conductores al centro [m]	Densidad relativa del aire	Tensión de inicio [kV]		
		Modelo en COMSOL	Artículo de referencia [14]	Simulación en Estambul [17]
0.001	0.77	20.585	19	
0.0035	0.77	21.876	20.1	
0.01	0.77	20.823	17.2	
0.01	1	71.256		69.65

### 3.3.3 Arreglo en haz de cuatro conductores

En un arreglo de cuatro conductores se tiene la misma distancia entre el conductor con respecto al centro de la jaula, la cual irá variando para visualizar la distribución del campo en cada una de ellas encontrando la tensión de inicio de la descarga corona.

En las Figuras 3.21 y 3.22, se expone la distribución del campo eléctrico en dos arreglos diferentes en haz de cuatro conductores siendo la primera correspondiente a una distancia igual a 0.037 [m] de los conductores al centro de la jaula y la segunda para una distancia de 0.014 [m] de los conductores al centro de la jaula.

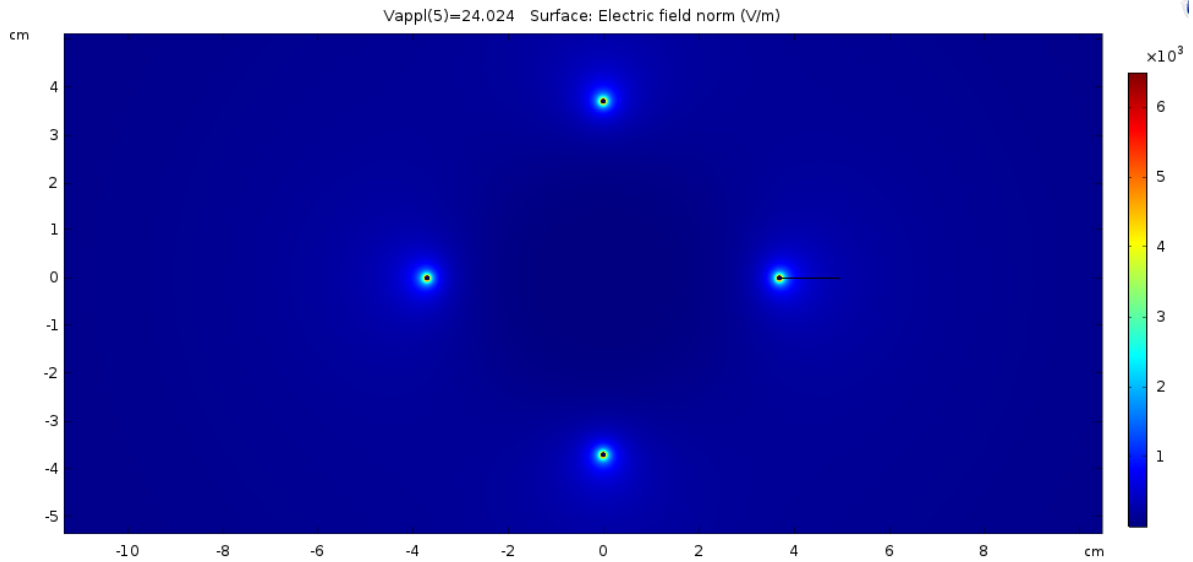


Figura 3.21 Arreglo en haz de cuatro conductores con una distancia de 0.037 [m] al centro de la jaula corona.

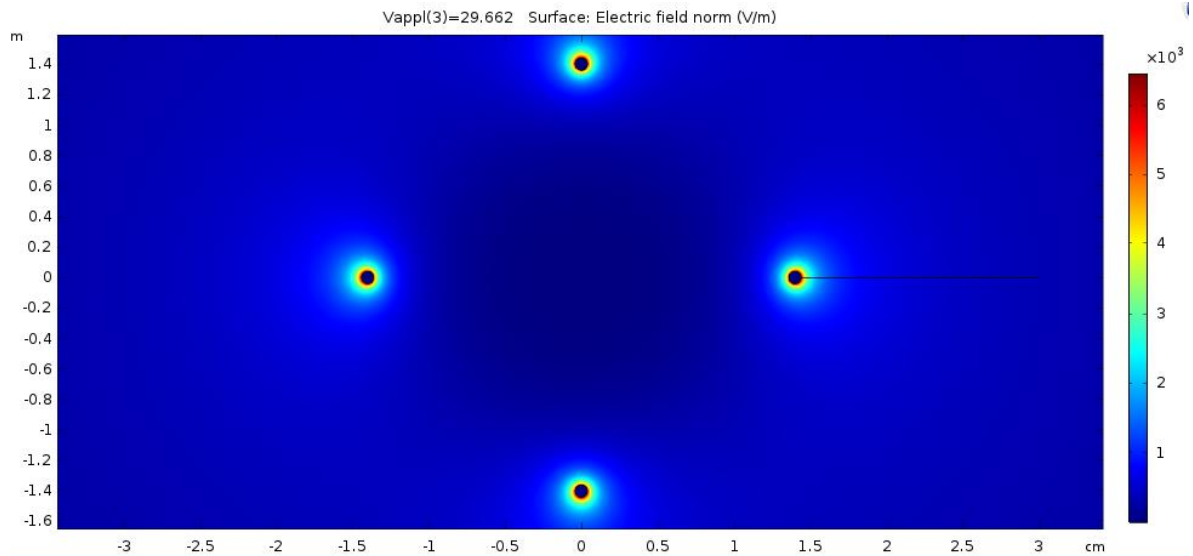


Figura 3.22 Arreglo en haz de cuatro conductores con una distancia de 0.014 [m] al centro de la jaula corona

Para el modelado de este tipo de arreglo, se tienen seis diferentes condiciones, en cinco de ellas variando la distancia entre conductores al centro de la jaula y en un caso, variando el radio de la jaula y la densidad relativa del aire. Para todos los casos en la Tabla 3.5, se indica el valor de la tensión de inicio de la descarga corona en kilo Volts ( $kV$ ), el valor del campo eléctrico en volts por metro ( $V/m$ ), el valor de la integral del coeficiente de ionización efectivo y el valor de la mejor aproximación de la constante "K".

**Tabla 3.5 Resultados obtenidos de la simulación para el arreglo de cuatro conductores.**

Radio de la Jaula [m]	Radio del conductor [m]	Densidad relativa del aire	Distancia de los conductores al centro [m]	Tensión de inicio [kV]	Campo eléctrico [V/m]	Valor de la integral	Valor de la constante "K"
0.185	0.0004	0.77	0.007	31.89	6400	8.1614	3503.08
0.185	0.0004	0.77	0.014	29.662	6450	8.1601	3498.53
0.300	0.002	1	0.014	98.446	5422	8.1606	3500.28
0.185	0.0004	0.77	0.0332	24.742	6467	8.1607	3500.63
0.185	0.0004	0.77	0.037	24.024	6471	8.1605	3500.00
0.185	0.0004	0.77	0.042	23.165	6475	8.1602	3498.88

La comparación de los resultados obtenidos para el arreglo en haz de cuatro conductores se presenta en la Tabla 3.6, en la cual solo se puede comparar dos resultados obtenidos.

**Tabla 3.6 Comparación de resultados para el arreglo de cuatro conductores.**

Distancia de los conductores al centro [m]	Densidad relativa del aire	Tensión de inicio [kV]		
		Modelo en COMSOL	Artículo de referencia [14]	Simulación de Estambul [17]
0.014	1	98.446		95.840
0.0332	0.77	24.742		



## CAPÍTULO 4

# VALIDACIÓN EXPERIMENTAL Y DISEÑO DE UNA JAULA CORONA

### 4.1 MEDICIÓN EXPERIMENTAL

Para la realización de las mediciones experimentales, se utilizó la jaula corona que se encuentra en el laboratorio de alta tensión de la ESIME Zacatenco. Las pruebas fueron llevadas a cabo en diferentes arreglos de conductores; para un conductor, para el arreglo en haz de dos y cuatro conductores (variando las distancias entre conductores al centro), para ello, se utilizó un conductor de cobre desnudo de 0.8 [mm] de diámetro, con una fuente de corriente directa de hasta 50 kV y una jaula corona de 0.1725 [m] de radio, la cual se muestra en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Jaula corona del laboratorio de alta tensión de ESIME Zacatenco.

Estas mediciones se realizaron en un ambiente semi controlado, debido a que se tomaron valores de temperatura con el equipo que se encuentra en el laboratorio ya mencionado. El diagrama físico se manifiesta en la Figura 4.2.

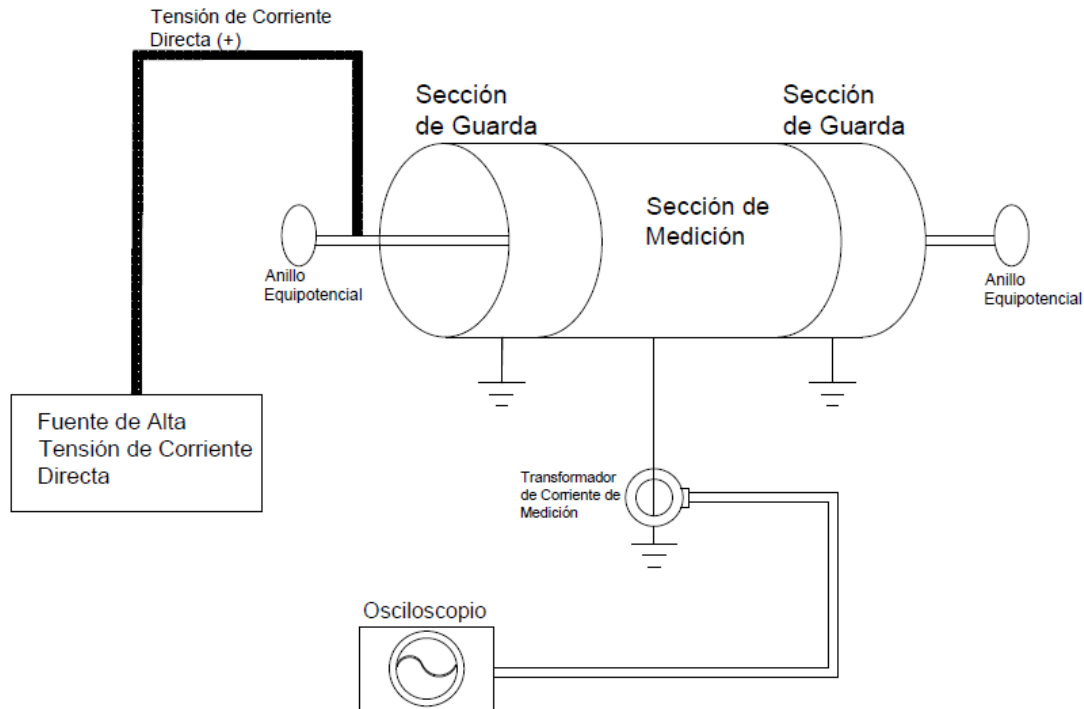


Figura 4.2 Diagrama físico

La medición se realizó mediante un transformador de corriente conectado a un osciloscopio. Este transformador detecta las descargas de corriente que son conducidas a tierra en forma de pulsos streamer; esto se visualiza en el osciloscopio (Figura 4.3).

Para definir la tensión de inicio de la corona, la tensión se va elevando lentamente desde cero hasta que aparecen los primeros pulsos de forma sostenida.

Para una medición efectiva se realizaron tres veces las mediciones en cada arreglo de conductores, con esto se hizo un promedio y se comparó dicho promedio con los valores obtenidos en las simulaciones.

Para el acomodo de los conductores, se debe asegurar que éstos estén tensados entre las bases de la jaula, conectados a los anillos equipotenciales, de esta manera se asegura que no existan defectos en el arreglo dentro de la jaula, además se constató que el arreglo de conductores puesto a prueba tuviera un punto medio dentro de la jaula con la finalidad de tener uniformidad en el campo de los conductores al cilindro de la jaula, de esta manera se asegura el tener una medición confiable.

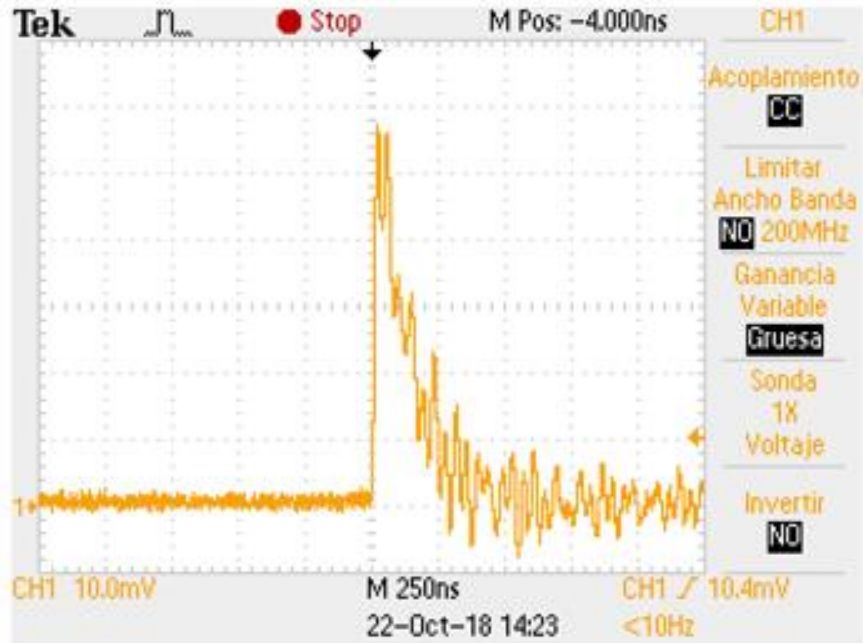


Figura 4.3 Descarga Corona medible

A continuación, se describe brevemente el equipo utilizado para realizar las mediciones experimentales dentro de la jaula corona.



Figura 4. 4 Fuente de Alto Voltaje de Corriente Directa

La fuente utilizada en la obtención de las mediciones experimentales es una fuente de corriente directa de la marca BERTAN Series Modelo 205B (Figura 4.4) con las siguientes características.

- Tensión: 1 - 50 [kV DC]
- Potencia: 15 - 30 [W]
- Polaridad: Positiva / Negativa
- Estabilidad:  $\leq 0.01\%$ /hora,  $0.02\%$ /8 horas.



Figura 4. 5 Transformador de Corriente

Debido a que la medición consiste en obtener los pulsos que son regresados a tierra de la Jaula Corona se utiliza un transformador de corriente (Figura 4.5) como sonda de medición.

El transformador utilizado corresponde al modelo: Modelo CT - 5.0, este transformador de corriente provee exactitud, y la posibilidad de medir pulsos unipolares o bipolares. Cuenta con las siguientes características.

- Rango:  $1[\mu\text{A}] - 20 [\text{kA}]$
- Frecuencia: 0.5 - 500 [MHz]
- Máximo rms: 2 [A]
- Máximo Pico: 200 [A]
- Caída: 3 [%/us]
- Subida: 0.875 [%/us]
- Max I.T.: 0.0002
- -3dblow: 4800 [Hz]
- -3dbhigh: 400 [MHz]





Figura 4. 6 Osciloscopio

Debido a que los pulsos corona son de alta frecuencia es necesario utilizar un osciloscopio de alta frecuencia de muestreo. Para ello se utilizó un osciloscopio digital de la marca Tektronix Modelo TDS2024B (Figura 4.6), el cual tiene un ancho de banda de 200 [MHz], una frecuencia de muestreo de 2.0 [GS/s], una longitud de registro de 2500 Puntos.

En ciertos casos, por señales externas (ruido), con el osciloscopio fue difícil detectar los pulsos corona, para estos casos, se utiliza un detector ultrasónico (Figura 4.7); éste nos permite detectar el sonido particular de la descarga corona.



Figura 4.7 Detector ultrasónico.

A fin de obtener datos efectivos, se utilizaron ambos instrumentos para detectar los pulsos de la descarga corona, comprobando así, que los pulsos aparecieran al tiempo de detectar el ruido ultrasónico.

#### 4.1.1 Arreglo de un conductor

Este arreglo es el más sencillo a utilizar, en un conductor el campo eléctrico se distribuye uniformemente a través de la superficie de éste. Debido a esto, se optó por utilizar un solo diámetro de conductor para la validación del modelo en este caso.

Tabla 4.1 Resultados obtenidos de la medición de un conductor.

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Medición 1	0.0004	0.1725	15.2

**Tabla 4.2 Comparación de los resultados experimentales de un conductor con el modelo de COMSOL Multiphysics.**

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Datos Experimentales	0.0004	0.1725	15.2
Modelo en COMSOL	0.0004	0.1725	15.759

Con la finalidad de conocer la exactitud del modelo se calcula el error porcentual con la ecuación (4.1).

$$Error = \left| \frac{Tensión\ medida - Tensión\ simulada}{Tensión\ simulada} \right| \times 100 \quad (4.1)$$

La ecuación (4.1) se utilizará en cada caso comparativo para encontrar el porcentaje de error del modelo con la medida experimental.

Para el arreglo de un solo conductor se tiene:

$$Error = \left| \frac{15.2 - 15.759}{15.759} \right| \times 100 = 3.54\% \quad (4.2)$$

Como se muestra en la ecuación 4.2, el modelo de COMSOL predice con un error de 3.54% la tensión de inicio de la descarga corona para el arreglo de un conductor.

#### 4.2.2 Arreglo en haz de dos conductores

Debido a que, en las líneas de AT, se utilizan arreglos de conductores para dividir el nivel de corriente de una línea entre el número de conductores del arreglo, es necesario hacer el estudio de dos conductores por fase, debido a las medidas de la jaula corona utilizada se realizan tres mediciones, con conductores separados entre centros por 0.005 [m], 0.015 [m] y 0.04 [m].



Figura 4.8 Arreglo de dos conductores.

En la Figura 4.5 se presenta el arreglo de dos conductores al realizar la experimentación en el laboratorio de alta tensión de la ESIME Zacatenco.

Los resultados obtenidos son presentados en las Tablas 4.3, 4.5 y 4.7, en las cuales se presentan las diferentes separaciones entre los conductores para el arreglo en haz de dos conductores.

La Tabla 4.3 corresponde a las mediciones para el arreglo en haz de dos conductores separados 0.005 [m]

**Tabla 4.3 Resultados obtenidos para el arreglo en haz de dos conductores separados 0.005 [m]**

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Distancia entre conductores [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Medición 1	0.0004	0.1725	0.005	21.17
Medición 2	0.0004	0.1725	0.005	21.22
Medición 3	0.0004	0.1725	0.005	21.10

En la Tabla 4.4 se muestra la comparación del promedio de las mediciones con respecto al modelo propuesto en el capítulo 3 del presente trabajo.



**Tabla 4.4 Comparación de los resultados experimentales de un arreglo en haz de dos conductores separados 0.005[m] con el modelo de COMSOL Multyphisics.**

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Distancia entre conductores [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Datos Experimentales	0.0004	0.1725	0.005	21.16
Modelo en COMSOL	0.0004	0.1725	0.005	21.515

$$Error = \left| \frac{21.16 - 21.515}{21.515} \right| \times 100 = 1.65\% \quad (4.3)$$

El error presentado para esta simulación con respecto a su medición experimental es igual a 1.65% el cual se calcula en la ecuación (4.3).

En la Tabla 4.5 se muestran las mediciones experimentales obtenidas para el arreglo en haz de dos conductores con una separación de 0.015 [m] entre ellos.

**Tabla 4.5 Resultados obtenidos para el arreglo en haz de dos conductores separados 0.015 [m].**

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Distancia entre conductores [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Medición 1	0.0004	0.1725	0.015	21.76
Medición 2	0.0004	0.1725	0.015	21.5
Medición 3	0.0004	0.1725	0.015	21.88

En la Tabla 4.6 se presenta la comparación de las mediciones experimentales con las mediciones obtenidas en el modelo de cálculo.

**Tabla 4.6 Comparación de los resultados experimentales del arreglo en haz de dos conductores separados 0.015[m] con el modelo de COMSOL Multyphysics.**

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Distancia entre conductores [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Valores experimentales	0.0004	0.1725	0.015	21.7133
Modelo en COMSOL	0.0004	0.1725	0.015	20.913

$$Error = \left| \frac{21.7133 - 20.913}{20.913} \right| \times 100 = 3.82\% \quad (4.4)$$

En la ecuación (4.4) se aprecia el error de 3.82% obtenido a partir de la comparación entre los valores experimentales y medidos.

Al igual que en las tablas anteriores, en la Tabla 4.7 se muestran los resultados obtenidos en la medición experimental para el arreglo en haz de dos conductores separados 0.04 [m].

**Tabla 4.7 Resultados obtenidos para el arreglo en haz de dos conductores separados 0.04 [m].**

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Distancia entre conductores [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Medición 1	0.0004	0.1725	0.04	19.80
Medición 2	0.0004	0.1725	0.04	19.37
Medición 3	0.0004	0.1725	0.04	19.37

En la Tabla 4.8 se muestra la comparación entre los valores obtenidos de la medición experimental y el modelo realizado en COMSOL Multiphysics.

**Tabla 4.8 Comparación de los resultados experimentales del arreglo en haz de dos conductores separados 0.04 [m] con el modelo de COMSOL Multiphysics.**

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Distancia entre conductores [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Valores experimentales	0.0004	0.1725	0.04	19.5133
Modelo en COMSOL	0.0004	0.1725	0.04	19.138

$$Error = \left| \frac{19.5133 - 19.138}{19.138} \right| \times 100 = 1.96\% \quad (4.5)$$

En la ecuación 4.5 se observa que el error obtenido del modelo de cálculo con respecto de esta medición experimental es de 1.96%.

### 4.1.3 Arreglo en haz de cuatro conductores

Un arreglo más complejo utilizado en este trabajo es de cuatro conductores (Figura 4.9), ya que el campo eléctrico se distribuye en la superficie de los conductores del arreglo, es importante ajustar el centro del arreglo con el centro de la jaula, de otra forma, la distribución del campo eléctrico no será uniforme, teniendo puntos más cercanos a tierra.

Para la validación del modelo en haz de cuatro conductores, se seleccionaron las siguientes distancias del centro de la jaula corona a los conductores:

- 0.007 [m]
- 0.014 [m]
- 0.042 [m]



Figura 4.9 Arreglo en haz de 4 conductores

Las mediciones obtenidas para el arreglo de cuatro conductores son reportadas en las Tablas 4.9, 4.11 y 4.13.

Mientras que en las Tablas 4.10, 4.12 y 4.14 se muestra la comparación de las mediciones obtenidas experimentalmente y simuladas.

**Tabla 4.9 Resultados obtenidos para el arreglo de cuatro conductores separados 0.007 [m].**

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Distancia entre conductores [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Medición 1	0.0004	0.1725	0.007	31.5
Medición 2	0.0004	0.1725	0.007	32.04
Medición 3	0.0004	0.1725	0.007	31.72

**Tabla 4.10 Comparación de los resultados experimentales de cuatro conductores separados 0.007 [m] con el modelo de COMSOL Multyphysics.**

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Distancia entre conductores [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Valores experimentales	0.0004	0.1725	0.007	31.7533
Modelo en COMSOL	0.0004	0.1725	0.007	31.276

$$Error = \left| \frac{31.7533 - 31.276}{31.276} \right| \times 100 = 1.52\% \quad (4.6)$$

En la ecuación (4.6) se obtiene el error de 1.52% de la medición obtenida en el modelo de cálculo con respecto a la obtenida experimentalmente.

**Tabla 4.11 Resultados obtenidos para el arreglo de cuatro conductores separados 0.014 [m].**

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Distancia entre conductores [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Medición 1	0.0004	0.1725	0.014	28.35
Medición 2	0.0004	0.1725	0.014	28.93
Medición 3	0.0004	0.1725	0.014	28.46

**Tabla 4.12 Comparación de los resultados experimentales de cuatro conductores separados 0.014 [m] con el modelo de COMSOL Multyphysics.**

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Distancia entre conductores [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Valores experimentales	0.0004	0.1725	0.014	28.58
Modelo en COMSOL	0.0004	0.1725	0.014	29.998

$$Error = \left| \frac{28.58 - 29.998}{29.998} \right| \times 100 = 4.72\% \quad (4.7)$$

Para el arreglo en haz de cuatro conductores con una separación de 0.014 [m] se obtiene un error mayor a los errores anteriormente vistos de 4.72% de la tensión obtenida en el modelo de cálculo con respecto a las mediciones obtenidas en el laboratorio.

**Tabla 4.13 Resultados obtenidos para el arreglo de cuatro conductores separados 0.042 [m].**

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Distancia entre conductores [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Medición 1	0.0004	0.1725	0.042	21.8
Medición 2	0.0004	0.1725	0.042	21.9
Medición 3	0.0004	0.1725	0.042	22.38

**Tabla 4.14 Comparación de los resultados experimentales de cuatro conductores separados 0.042 [m] con el modelo de COMSOL Multiphysics.**

	Radio del conductor [m]	Radio de la Jaula [m]	Distancia entre conductores [m]	Tensión de inicio de la descarga Corona [kV]
Valores experimentales	0.0004	0.1725	0.042	22.0266
Modelo en COMSOL	0.0004	0.1725	0.042	22.460

$$Error = \left| \frac{22.0266 - 22.46}{22.46} \right| \times 100 = 1.93\% \quad (4.8)$$

En la ecuación (4.8) se muestra el error obtenido de 1.93% para el arreglo en haz de cuatro conductores con una separación de 0.042 [m] al centro.

## 4.2 DISEÑO DE LA JAULA CORONA

Una vez validado el modelo en COMSOL Multiphysics, por medio de las mediciones experimentales en la jaula corona del laboratorio de alta tensión de la ESIME Zacatenco, se propone una jaula de mayor tamaño, en la cual se espera probar conductores de mayor radio y de uso comercial en líneas transmisión y subtransmisión. Esta propuesta se plantea con el fin de usarse en el laboratorio de alta tensión de la ESIME Zacatenco, conectada a una fuente de corriente directa de 150 kV.

Teniendo en cuenta el espacio disponible para colocar la jaula se diseña de tal manera que ésta no esté fija en un solo sitio si así se desea.

### 4.2.1 Longitud de la jaula corona

El cuerpo de la jaula corona consta de tres cilindros concéntricos de un mismo radio, los cilindros de exteriores tienen una longitud de 0.35 [m], mientras que el cilindro de medición es de 0.73 [m]. En la Figura 4.10, se observa el corte longitudinal de la relación del diámetro interno con la longitud de la jaula. Señalándose la separación entre cilindros.

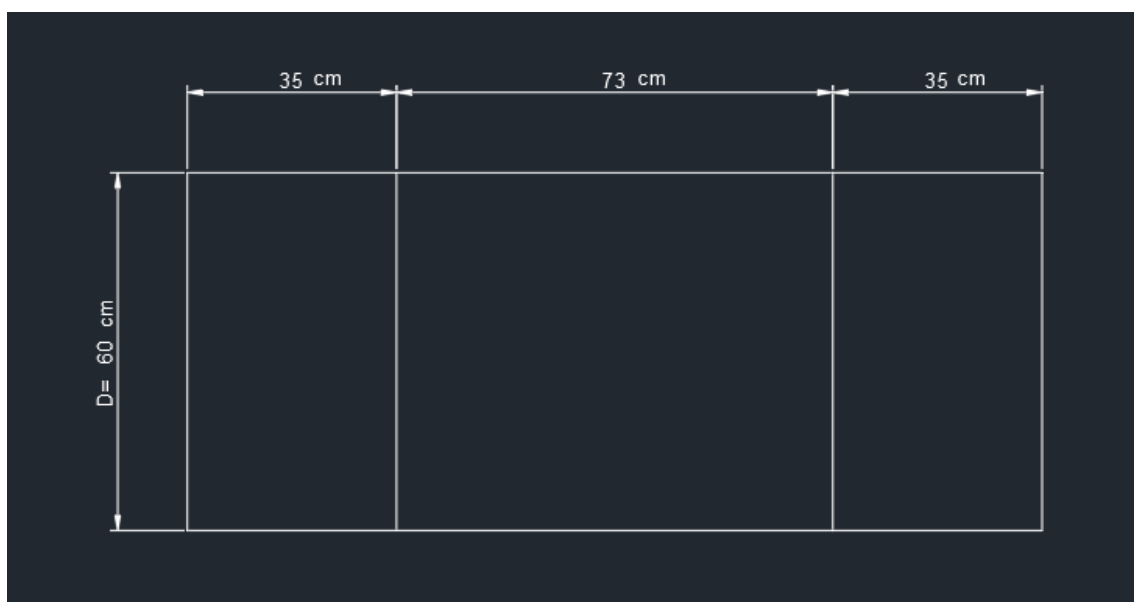


Figura 4.10 Corte longitudinal de la jaula corona.

#### 4.2.2 Anillos equipotenciales

Se proponen anillos equipotenciales en forma de toroide, con un radio interno de 9.33 [cm] y radio exterior de 12.97 [cm] en la Figura 4.11 se presenta el diseño del toroide.

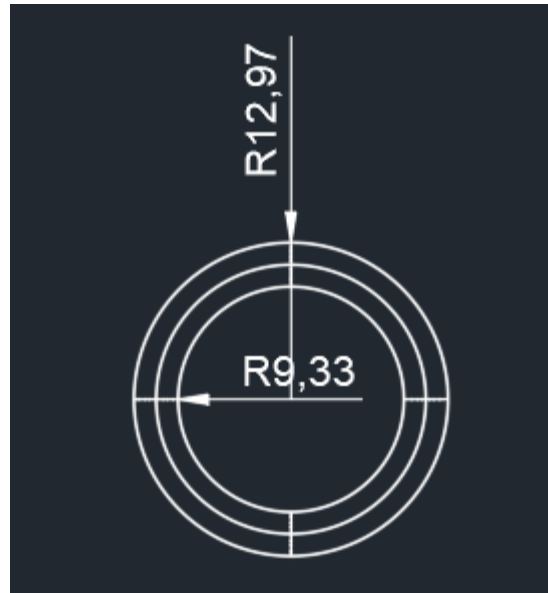


Figura 4.11 Anillo equipotencial

Los anillos equipotenciales deben ser colocados a la misma altura del centro de la jaula corona y con la misma separación entre ellos tomando como referencia el centro de la jaula. Teniendo en cuenta que estos anillos equipotenciales son colocados en los extremos de la jaula sin que ellos entren en contacto con los cilindros de guarda, como se muestra en la Figura 4.13.

Para una correcta distribución del campo eléctrico dentro de la jaula es necesario hacer un rolado en la terminación de los cilindros exteriores. Las dimensiones del rolado propuesto se exponen en la Figura 4.12.

Para conseguir el rolado, se propone un diámetro exterior del cilindro de 0.3217 [m] de tal modo que el rolado se realice hacia afuera, con esto se mantiene la condición de un diámetro interno de la jaula corona de 0.6 [m].

En la Figura 4.13 se visualiza la presentación de la jaula con anillos equipotenciales y el rolado propuesto.





Figura 4.12 Vista frontal del rolado propuesto.

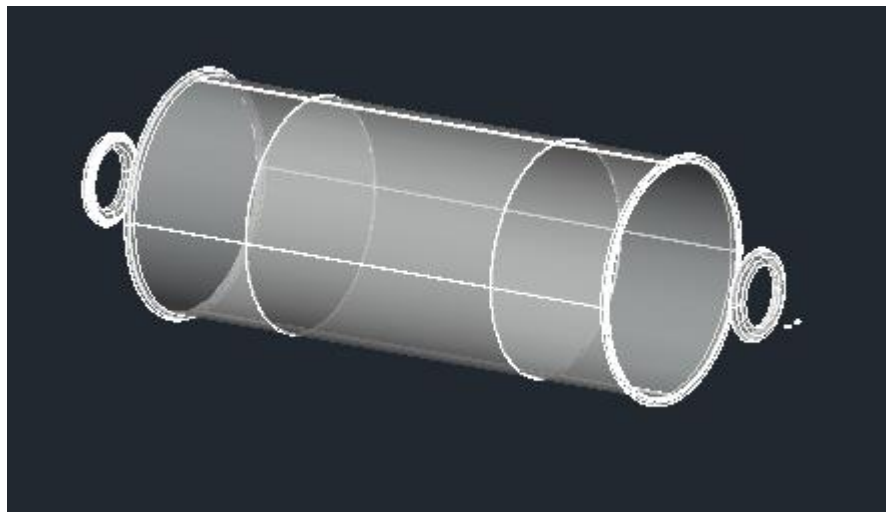


Figura 4.13 Presentación de la jaula corona.

### 4.2.3 Soporte de la jaula

Debido a que los materiales más usados para la construcción de una jaula corona son el acero o aluminio, el peso total de la jaula debe ser soportado por una estructura aislante.

En la Figura 4.14 se presenta la propuesta de la base teniendo una media luna de un diámetro de 0.62 [m], con una altura de 0.5 [m] y un grosor de 0.15 [m], a esta base de madera se le añaden agarraderas en los costados para su cómoda movilidad a través del laboratorio de alta tensión.

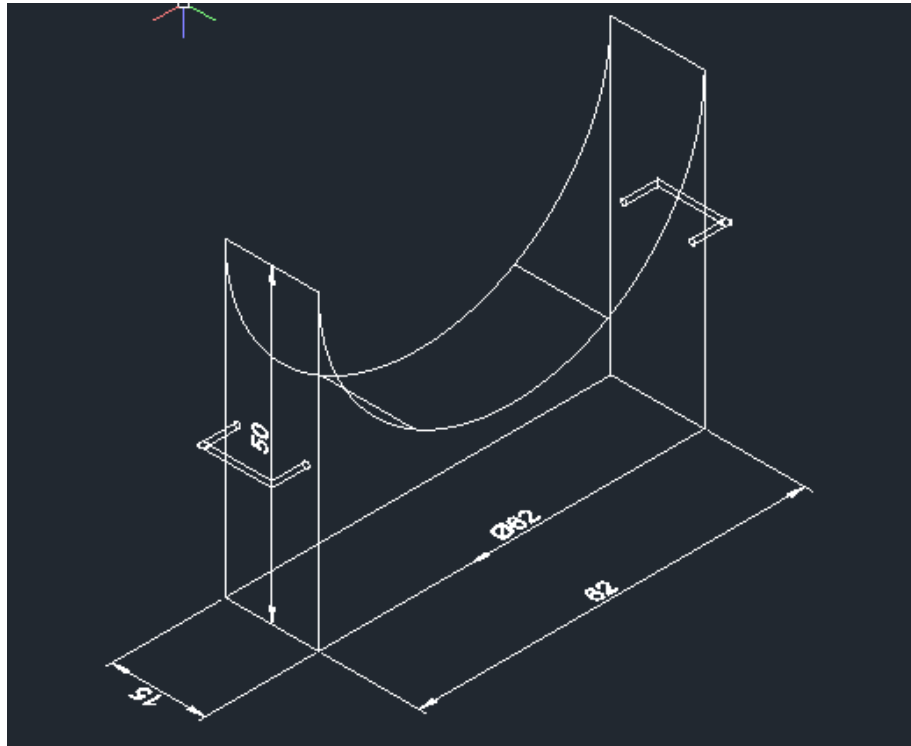


Figura 4.14 Soporte diseñado para los cilindros de la jaula corona.

Para el soporte del conductor y de los anillos equipotenciales se coloca en el diseño, un par de bases aislantes con orificios en su estructura. Como el mostrado en la Figura 4.15.

Otra función para esta base es la tensión mecánica que ejerce sobre el conductor al colocarlo en los orificios exteriores de la base para que éste quede totalmente rígido y sea colocado en medio de la jaula con el fin de que cada punto del conductor tenga la misma distancia al contorno de la jaula y así se tenga una correcta medición.

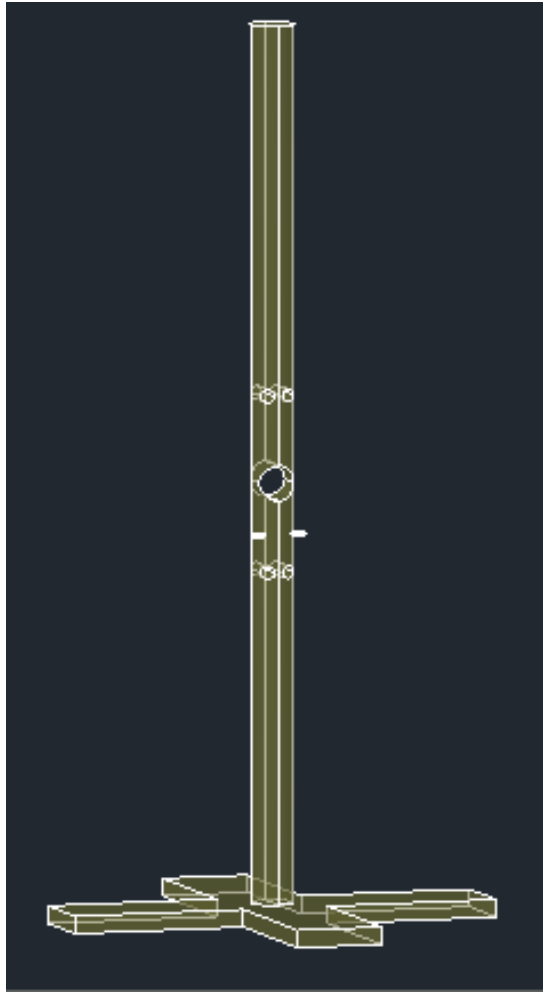


Figura 4.15 Soporte del conductor y de los anillos equipotenciales

#### 4.2.4 Propuesta de la jaula corona

Con base a lo propuesto anteriormente, en la Figura 4.16 se aprecia la conjunción de los elementos para nuestro diseño de una jaula corona en el laboratorio de alta tensión.

La cual tiene la posibilidad de moverse a lo largo de éste y de no siempre estar en un mismo punto, si es que se desea reacomodar o utilizar fuera del laboratorio, ya que las bases aislantes son fáciles de mover con las agarraderas a sus costados.

El diseño final tiene una longitud total de aproximadamente 2.07 [m], distancia que es posible aumentar si los soportes aislantes son recorridos para la correcta tensión mecánica del conductor.

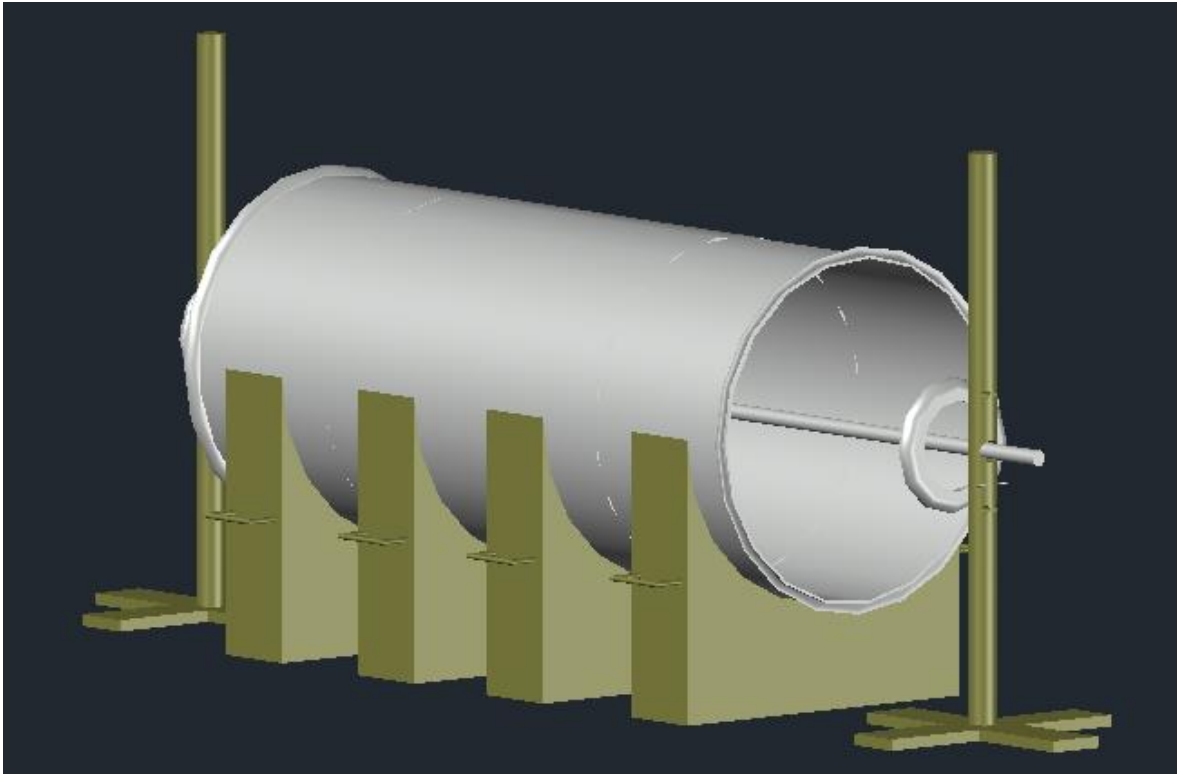


Figura 4.16 Diseño final de la jaula corona

### **4.3 SIMULACIÓN DE JAULA CORONA PROPUESTA, CON CONDUCTORES REALES**

Con base al diseño propuesto en la sección anterior se realizan simulaciones en el software COMSOL Multiphysics, con la finalidad de asegurarnos que la jaula propuesta esté dentro de los parámetros eléctricos para el estudio de conductores. Para este propósito se crea un modelo en 2D y uno en 3D de la jaula y se prueban diferentes conductores

Los conductores por simular son tomados del catálogo de “Cables para Transmisión y Distribución de Energía” de General Cable 2015, en la sección de cable de aluminio, con cableado concéntrico y núcleo de acero galvanizado ACSR, esta sección está especificada para conductores aplicados en líneas aéreas de transmisión y subtransmisión de energía eléctrica a grandes distancias.

Debido a que la jaula corona se utiliza en una altura sobre el nivel del mar igual que la de la Ciudad de México, todas las simulaciones de este modelo se realizan con una densidad relativa del aire ( $\delta$ ) igual a 0.77.

Siguiendo la metodología utilizada para el cálculo de la tensión de inicio se realizó el modelo para un conductor de 21.77 [mm] de diámetro el cual se puede observar en la Figura 4.14.

En la Tabla 4.15 se muestran los conductores simulados, su calibre en AWG y KCM, el diámetro total equivalente, la tensión de inicio del efecto corona y el mejor valor de la constante “K” arrojado por el programa:

**Tabla 4.15 Conductores simulados la jaula propuesta**

Nombre de referencia del conductor	Calibre AWG/kCM	Diámetro total nominal [mm]	Tensión de inicio de la descarga corona [kV]	Mejor valor para la constante “K” obtenido
ROBIN	1	9	72.419	8.1604
RAVEN	1/0	10.11	77.631	8.1604
QUAIL	2/0	11.34	83.12	8.1607
HAWK	477	21.77	121.52	8.1604
DOVE	556.5	23.55	127.05	8.1608
STARLING	715.5	26.68	136.23	8.1599
TERN	795	27.03	137.22	8.1607
RAIL	954	29.61	144.29	8.1568
ORTOLAN	1033.5	30.81	147.45	8.1597
CURLEW	1033.5	31.59	149.47	8.1606
BLUEJAY	1113.0	31.98	-	-

Como se observa en la tabla, el modelo para una jaula corona de diámetro igual a 0.6 m y una tensión máxima de 150 kV, es aplicable para conductores o arreglos menores de 31.98 mm de diámetro, debido a que, con este diámetro de conductor, la tensión aplicada no es suficiente para generar el efecto corona en dicho cable, mientras que, en arreglos menores, se puede generar esta descarga. Sin embargo, considerando un posible error máximo del 5 %, se considera que con los últimos cuatro tipos de conductores de la Tabla 4.15, puede correrse el riesgo de no alcanzar la tensión necesaria para la descarga corona.

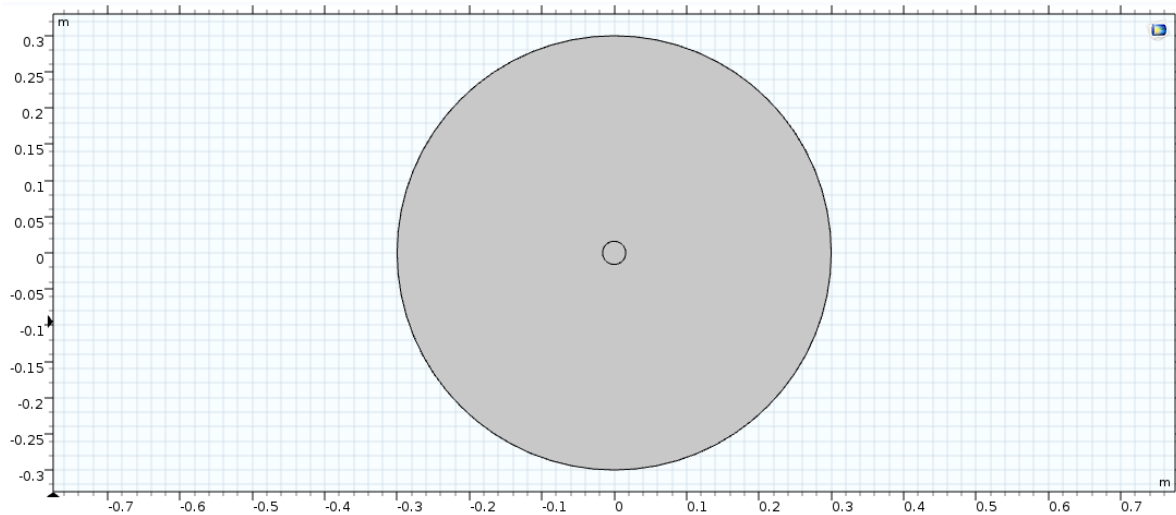


Figura 4.17 Modelo de jaula corona para estudio en 2D con conductor de 21.77 [mm] de diámetro.

Un ejemplo de esto se observa en la Figura 4.18 donde se muestra la distribución del campo eléctrico en el conductor de 21.77 [mm] de diámetro (HAWK). Con el fin de visualizar de manera detallada este efecto en la Figura 4.19 se aprecia la gráfica del campo eléctrico con respecto de la tensión aplicada dentro de la jaula, en la cual se visualiza la caída del campo a medida que se aleja del conductor.

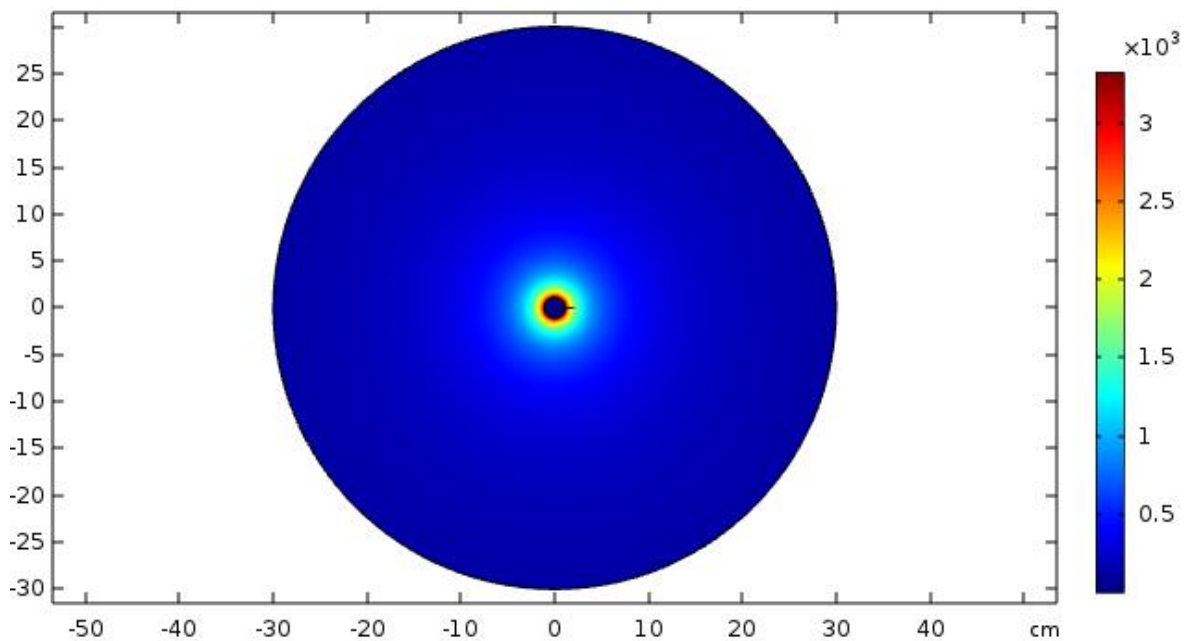


Figura 4.18 Campo eléctrico del conductor de 21.77 [mm] de diámetro.

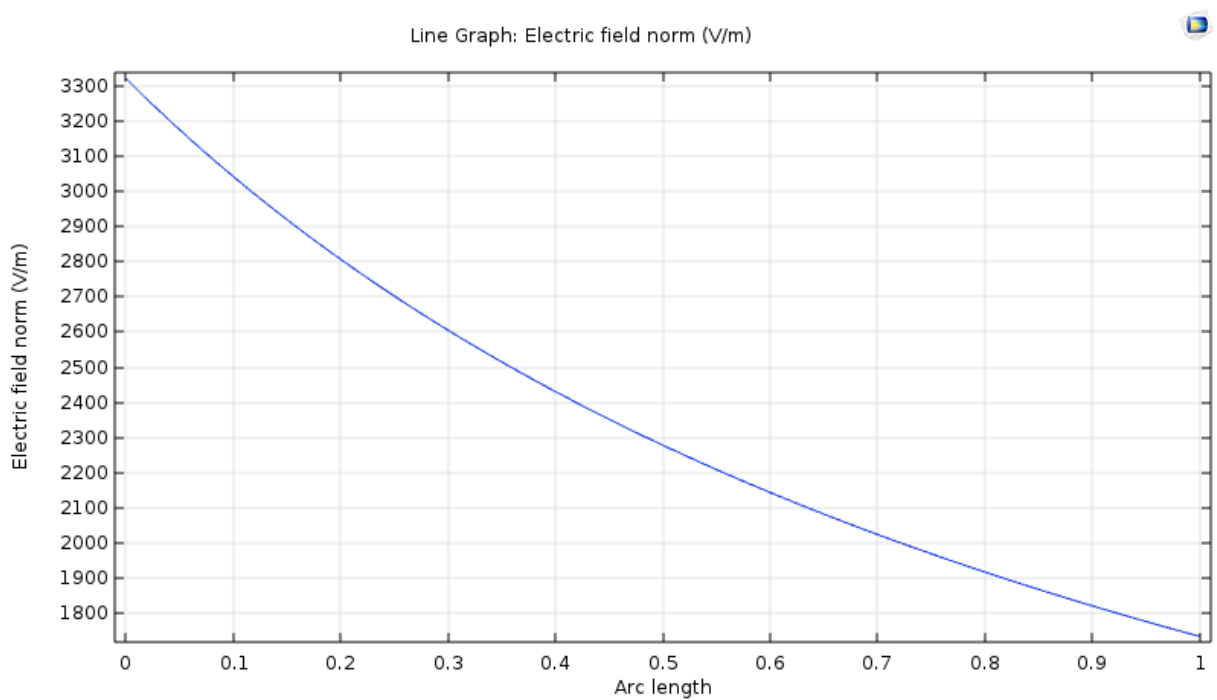


Figura 4.19 Gráfica del campo eléctrico del conductor de 21.77 [mm] de diámetro.

Continuando con la metodología del cálculo obtenemos la distancia del coeficiente de ionización efectivo que será la distancia a la cual se evaluará la función para obtener la tensión de inicio del conductor de 21.77 [mm] de diámetro.

En la Figura 4.20 se observa el valor absoluto del coeficiente de ionización efectivo.

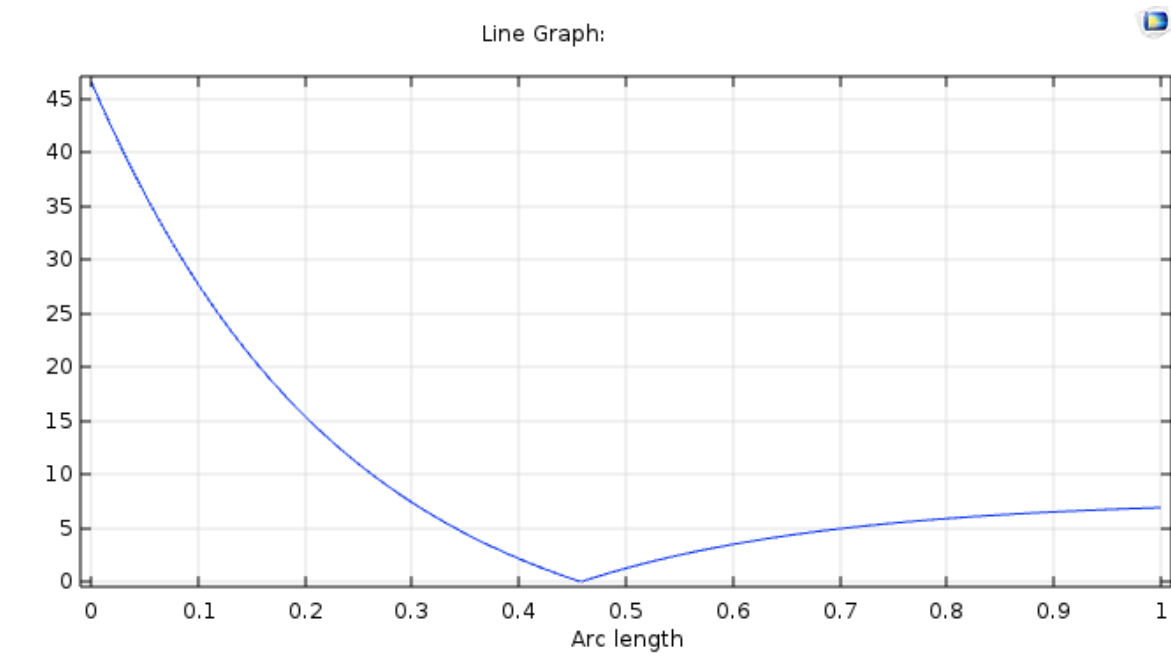


Figura 4.20 Gráfica del Alfa efectivo a la cual en el conductor de 21.77 [mm] de diámetro inicia la descarga corona.

### 4.3.1 Modelado del campo eléctrico

Un elemento importante que contribuye al estudio del efecto corona es la distribución uniforme del campo eléctrico en la dirección axial de la jaula.

Para ello, una vez conocida la tensión de inicio del efecto corona para un determinado diámetro, se puede modelar una jaula corona en tres dimensiones en COMSOL Multiphysics.

Al realizar el modelado, es necesario colocar los anillos o esferas equipotenciales en los extremos del conductor a estudiar, del mismo modo se coloca el arreglo de la jaula corona en el medio aislante (aire), como se observa en la Figura 4.21 donde el medio aislante es lo que envuelve a toda la jaula.

De esta manera el cálculo se delimita a la zona envuelta en aire.



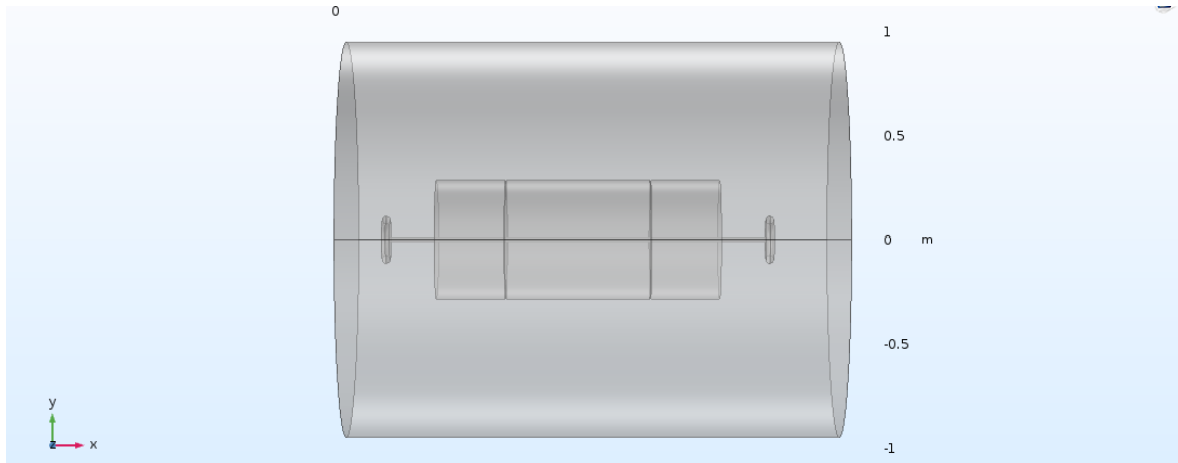


Figura 4.21 Jaula corona con conductor de diámetro 27.03 mm y anillos equipotenciales envueltos en aire.

De esta manera en la Figura 4.22 observamos la correcta distribución del campo eléctrico que tendrá la jaula corona diseñada al realizar el estudio en los diferentes conductores que se proponen.

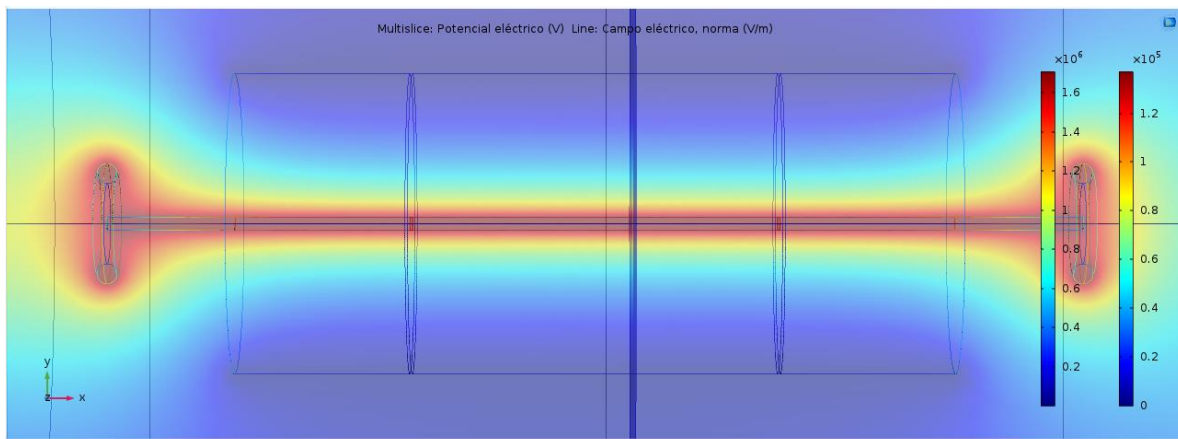


Figura 4.22 Potencial eléctrico y distribución del campo eléctrico en un conductor de diámetro igual a 27.03 [mm].

Así en la Figura 4.23 se presenta la gráfica de la distribución del campo a lo largo de la jaula, en la cual se observa que el efecto borde es reducido por los anillos equipotenciales colocados en la parte exterior del cilindro de la jaula corona, este efecto hace que el campo se mantenga constante a lo largo de la jaula.

Al llegar a la sección de guarda el campo eléctrico decrece y los valores de mayor magnitud se mantienen dentro del área de estudio sin provocar algún error de medición por el inicio de la descarga corona en las zonas externas de la jaula corona.

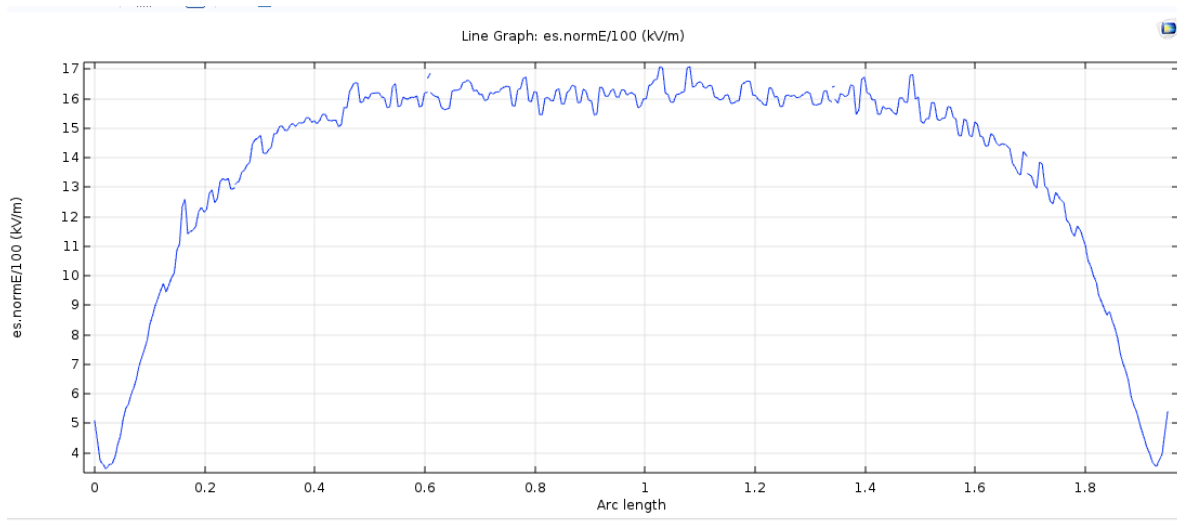


Figura 4.23 Distribución del campo eléctrico en la jaula corona para un conductor de 27.03 mm de diámetro.

Cabe mencionar que por ser una simulación en 3D el mallado no es muy fino, esto provoca una variación considerable en los valores de campo eléctrico como se puede ver en la Figura 4.23.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se implementa un modelo en COMSOL Multiphysics, en el cual, a partir de la programación de fórmulas experimentales de los coeficientes de ionización y captura, se puede calcular la tensión de inicio de la descarga corona en conductores de alta tensión de corriente directa.

Los arreglos en haz de conductores son ampliamente utilizados en líneas de alta tensión en corriente directa. Al igual que en CA, se debe tomar en cuenta durante el proceso de diseño la tensión de inicio de la descarga corona en estos arreglos. El modelo implementado puede ser utilizado para definir una distancia óptima de separación entre conductores, con el fin de asegurar que la descarga corona inicie a una tensión lo más elevada posible.

A su vez, el modelo permite introducir valores de densidad relativa del aire, lo cual es un factor determinante en la tensión de inicio de la descarga corona, con ello se puede aplicar a cualquier altura sobre el nivel de mar, simulando así las condiciones reales del ambiente al cual estará sometido el conductor o haz de conductores.

El modelo se considera confiable debido a que mostró un bajo porcentaje de error con respecto a las mediciones experimentales realizadas para validarlo. Siendo el error más alto de 4.72%, para el arreglo en haz de cuatro conductores con una separación al centro de 0.0014 [m], y el error mínimo obtenido fue de 1.52% para un arreglo en haz de cuatro conductores con una separación al centro de 0.007 [m].

Una vez validado el modelo, éste se utiliza para diseñar una jaula corona de mayores dimensiones a la que se tiene actualmente en el laboratorio de Alta Tensión en la ESIME Zacatenco. Esta nueva jaula permitirá el estudio en el laboratorio de la descarga corona con conductores estandarizados utilizados en líneas de alta tensión. Se encontró que para una tensión máxima de diseño de 150 kV CD de polaridad positiva el diámetro máximo de conductor que se puede analizar en esta jaula es de 31.59 [mm]

## **5.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

Debido a que el efecto corona no solo se presenta en la superficie de los conductores, se puede seguir la metodología de programación propuesta para hacer el estudio en diferentes secciones de una línea de transmisión como son los herrajes. Así mismo, el modelo es flexible con lo cual se pueden modificar los radios utilizados (de los conductores y la jaula), la geometría del haz de conductores (arreglos equidistantes o arreglos asimétricos), la tensión aplicada y simular un ambiente controlado, para obtener la tensión de inicio de la descarga corona donde se proponga.

# REFERENCIAS

- [1] P. Sarma Maruvada. *Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines*, Investigaciones y Estudios de Prensa LTD. Inglaterra, 2000.
- [2] A. Kalair, N. Abas y N.Khan. “Comparative study of HVAC and HVDC transmission systems” *Revisiones de Energia Renovable y Sostenible* Vol. 59, Junio 2016, Pags. 1653-1675
- [3] J. S. Dejeumen y J. J. Walker, “Enviromental Influence on Corona Inceprtion With HVDC Application” *XX Simposio Internacional de Ingenieria de Alto Voltaje*. Buenos Aires, Argentina, Agosto 27-Septiembre 01, 2017.
- [4] A. Font, M. Sait Ersoy, S. Ilhan, A. Ozdemir, F. Espino Cortes, “AC/DC Corona Characteristics of The Conductors in an Indoor Corona Cage”, *XX Simposio Internacional de Ingenieria de Alto Voltaje*. Buenos Aires, Argentina, Agosto 27-Septiembre 01, 2017.
- [5] L. M. Checa, *Líneas de Transporte de Energía*, ALFAOMEGA, Tercera edición, Barcelona Mexico.1988
- [6] G. C. Sibiliant, *A study of high voltage direct current conductor corona in a purpose built corona cage*, University of Durban-Westville, Marzo, 2003.
- [7] F. Espino-Cortés, "Apuntes de Teoría Electromagnética", SEPI ESIME Zacatenco, 2018.
- [8] D.B. Phillips, R.G. Olsen y P.D. Pedrow, “Corona Onset as a Design Optimization Criterion for High Voltage Hardware”, *Transacciones IEEE en dielectricos y aislamiento electrico*, Vol. 7 No. 6, Diciembre 2000.
- [9] Secretaría de energía blog, Presentación de 1era. Licitación de SENER para la participación privada de líneas de transmisión eléctrica, Diciembre 2017.
- [10] X. Q. Zhang, “Study on Corona Characteristics Under Nonstandard Lightning Impulses”, *Ingenieria Eléctrica Springer*, 2007, 89, pp. 519 – 524, DOI 10.1007/s00202 – 006 – 0036 – 0.
- [11] R. G. Olsen, M. W. Tuominen and J. T. Leman, “ On Corona Testing of High-Voltage Hardware Using Laboratory Testing and/or Simulation”, *Transacciones IEEE en la entrega de energía*, VOL. 33, NO. 4, august 2018.
- [12] H. Liu, R. Liao, Q. Zhu, K. Liu and X. Zhao, “Distribution of Space Charge Around Conductor Line in a Small Corona Cage Under Various Influencing Factors” *XX Simposio Internacional de Ingenieria de Alto Voltaje*. Buenos Aires, Argentina, Agosto 27-Septiembre 01, 2017.
- [13] N. Parus, N. Mahatho, T. Govender, I.R. Jandrell and H.A. Roets, “The Effect Of Altitude, Temperature and Humidity On Conductor Corona and Audiable Noise Under HVDC Voltage Stress” *XX Simposio Internacional de Ingenieria de Alto Voltaje*. Buenos Aires, Argentina, Agosto 27-Septiembre 01, 2017.
- [14] D. A. Espinosa Rivera, C. H. Sanchez, F. P. Espino Cortes, P. Gómez, “Estudio de la Tensión de Incepción de Descarga Corona en Arreglos Multiconductores Optimizados” Artículo No. ELE005, Artículo Aceptado Por REFEREO, *XIII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (XIII CNIES)*, Noviembre 2012.

- [15] D. Tiku. "Dc Power Transmission, Mercury-arc to Thyristor HVDC valves" *IEEE power & energy magazine* vol. 12 issue 2, Marzo – Abril 2014.
- [16] Proyectos México "Construcción, modernización, operación y mantenimiento de la línea de transmisión de corriente directa, Yautepec - Ixtepec, en los estados de México, Morelos, Oaxaca, Puebla, Veracruz y Ciudad de México". Disponible en: [https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto\\_inversion/024-linea-de-transmision-de-corriente-directa-yautepec-ixtepec/](https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto_inversion/024-linea-de-transmision-de-corriente-directa-yautepec-ixtepec/) Fecha de actualización: 05/11/2018.
- [17] R. Vazquez Cortes, F.P. Espino Cortes, R. Linares y Miranda, A.Ozdemir, S. Ilhan, "Corona Onset Model for Positive Direct Current Voltage" Artículo No. IM-009 No. ELE005, Artículo Aceptado Por REFEREO, XVII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (XVII CNIES), Noviembre 2018.
- [18] Jose Luis Tora Galvan, "Transporte de la Energía Eléctrica, Líneas Aéreas a M. A. T. y C. A. " UPCO, Madrid, 1997.
- [19] W. Wang, C. Li, J. Fan, C. Gu, Y. Jiang, G. Cui " Study of UHV DC Corona Performance in a Mini Corona Cage" *IEEE, Beijing Laboratorio de alto voltaje & EMC, Laboratorio de energia Sistema de proteccion y seguridad dinamica monitoreo y control, Ministerio de educacion, North China Electric Power University, Dawai, Zhuxizhuang, Beijing, 102206, China, EPRI, Xiaoying, Qinghe, Beijing, 100085, China, 2007.*