



**UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA**

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Diseño y construcción de una jaula corona para generación y medición
de fenómenos asociados al efecto corona en líneas de transmisión

Alvaro Antonio Bozo Guajardo

Requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero Electricista

Profesor guía: Dr. Johny Montaña Chaparro (UTFSM)

Profesor Correferente: Dr. Roger Schurch Brandt (UTFSM)

JULIO, 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: "Diseño y construcción de una jaula corona para generación y medición de fenómenos asociados al efecto corona en líneas de transmisión"

Nombre del candidato(a): Alvaro Antonio Bozo Guajardo

Carrera / Grado: Ingeniería Eléctrica

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Ingeniería Eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Johny Montaña Chaparro, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 07-07-2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 07-07-2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

Escribir estas palabras marca un antes y un después en mi vida. Con esto, doy el primer paso hacia una nueva etapa, y por eso quiero agradecer y dedicar este trabajo a todas las personas que depositaron en mí sus esperanzas y buenos deseos.

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres y a mi hermana, quienes han sido fundamentales en este proceso. Gracias por ayudarme a levantarme cada vez que caí y por enseñarme a no rendirme, incluso cuando el camino fue difícil. Los amo profundamente y seguiré esforzándome por ser una buena persona, tal como ustedes me han enseñado. Agradezco también a toda mi familia —tíos, primos, abuelos— y a todos quienes me brindaron sus consejos y apoyo a lo largo de esta etapa. Un agradecimiento especial para mi Chelita y mi Tata Pipi, quienes, aunque ya no estén físicamente en este plano, siguen siendo una parte esencial de mi vida y siempre los llevo presentes.

También quiero agradecer a todos los amigos que he hecho en el camino, en especial a mi grupo inseparable, a quienes agradezco de todo corazón haber conocido. Extiendo un sincero y especial agradecimiento a mi tocayo Álvaro Miranda, quien de manera desinteresada fue clave en el éxito de este proyecto, así como también lo fue Frank Aguilar. Muchísimas gracias a ambos. A Claudio Ramos, Cristian Andrades y Cristian Videla, gracias por todo su apoyo y amabilidad durante el proceso experimental. A todos mis compañeros memoristas de Alta Tensión, especialmente a Nicolás Rojas, Osvaldo Núñez y Diego Herrera, gracias por convertirse en una nueva familia dentro de la Universidad.

Finalmente, agradezco profundamente a mi profesor guía Johny Montaña y a mi profesor curreferente Roger Schurch por todo el apoyo brindado durante la realización de esta memoria. En especial, al profesor Johny, quien, a pesar de todos los baches y dificultades, siempre me motivó a continuar hasta el final.

Reiterando mis agradecimientos a todas las personas presentes en mi vida y a quienes me han acompañado en este camino, solo espero de corazón haber sido también una buena presencia en sus vidas. Los quiero mucho, y gracias por todo.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivo General	4
1.2. Objetivos Específicos	4
2. Marco teórico	5
2.1. Introducción al Efecto Corona	5
2.1.1. Procesos favorables a la descarga	6
2.1.2. Procesos desfavorables a la descarga	7
2.2. Mecanismos de la Descarga Corona	8
2.2.1. Corona Positiva DC	8
2.2.2. Corona Negativa DC	10
2.2.3. Corona AC	12
2.3. Variables que influyen en el Efecto Corona	13
2.3.1. Gradiente superficial	14
2.3.2. Estado de la superficie del conductor	15
2.3.3. Densidad relativa del aire	15
2.3.4. Distancia entre electrodos	16
2.3.5. Efecto del agua sobre el conductor	16
2.4. Métodos para el cálculo del gradiente superficial de un conductor	16
2.4.1. Conductor aislado	17
2.4.2. Conductor aislado encima de tierra	18
2.4.3. Método de Markt y Mengele para un haz de conductores	20
2.5. Métodos para el cálculo de pérdidas corona	23
2.5.1. Método de Peek	23
2.5.2. Método de Peterson	24
2.6. Jaula Corona	27
2.6.1. Principio de funcionamiento	28
2.6.2. Criterios de diseño geométrico de la jaula	29

2.6.3.	Análisis del campo eléctrico en la jaula corona	31
2.6.4.	Condiciones de prueba y medición en la jaula corona	32
2.6.5.	Ventajas, limitaciones y aplicaciones de la jaula corona	33
2.7.	Resumen y consideraciones	34
3.	Diseño y construcción de la jaula corona	35
3.1.	Determinación de parámetros	35
3.1.1.	Largo de la sección de medición	37
3.1.2.	Largo de la sección de apantallamiento	37
3.2.	Simulaciones realizadas	38
3.3.	Diseño de la jaula	41
3.3.1.	Primer Modelo	42
3.3.2.	Segundo Modelo	43
3.4.	Decisión del modelo a construir	44
4.	Modelo Experimental	46
4.0.1.	Elementos del modelo experimental	47
5.	Resultados y análisis	54
5.1.	Preámbulo	54
5.2.	Gráficas de corriente de fuga para aluminio	56
5.3.	Gráficas de corriente de fuga para cobre	57
5.4.	Análisis de los resultados	59
6.	Conclusiones	62
6.1.	Trabajos futuros	64
7.	Anexos	66
7.1.	Diseño y construcción de la jaula corona	66
7.2.	Modelo experimental	68
7.2.1.	Aislador	68
7.2.2.	Tensor ocupado en las pruebas	69
7.2.3.	Conductores usados en las pruebas	70
7.2.4.	Transformador ocupado en las pruebas	71
7.3.	Análisis de resultados	72
7.3.1.	Gráficas con conductor de aluminio usando $R_{sh1} = 4239 [\Omega]$	72
7.3.2.	Gráficas con conductor de cobre usando $R_{sh1} = 4239 [\Omega]$	73

Índice de tablas

1.1. Niveles máximos permisibles de presión sonora	3
2.1. Valor del coeficiente de estado de superficie del conductor m para distintas consideraciones	15
2.2. Valores de m para el cálculo de la la tensión característica de línea	25
3.1. Medidas de las diferentes jaulas corona reportadas en artículos (Elaboración propia).	35
3.2. Valores escogidos para los diferentes parámetros geométricos de la jaula corona (Elaboración propia).	38
3.3. Tabla comparativa para la decisión del modelo escogido (Elaboración propia). . . .	44
4.1. Datasheet de aislador de suspensión polimérico de 8 polleras	48
4.2. Características del conductor de aluminio utilizado	50
4.3. Características del conductor de cobre utilizado durante las pruebas	50
4.4. Medidas de las bases de madera (Elaboración propia).	51
5.1. Condiciones ambientales del ensayo con el conductor de aluminio (Elaboración propia).	56
5.2. Condiciones ambientales del ensayo con el conductor de cobre (Elaboración propia).	57

Índice de figuras

1.1. Microclimas de la República de Chile	1
1.2. Efecto corona en líneas de transmisión	2
1.3. Efecto corona en aisladores	2
2.1. Desarrollo de la primera y las subsecuentes generaciones de avalanchas en descargas Corona Positivas	9
2.2. Fotografías y oscilogramas correspondientes a los distintos modos de corriente corona para DC positiva	10
2.3. Desarrollo de la avalancha electrónica en descargas corona negativas	11
2.4. Fotografías y oscilogramas correspondientes a los distintos modos de corriente corona para DC negativa	12
2.5. Modos Coronas típicos para AC	13
2.6. Método de imágenes para el cálculo de gradiente superficial (Elaboración propia). .	19
2.7. Distribución de sub-conductores en un haz circular	21
2.8. Variación periférica del campo en conductor cableado	23
2.9. Función de Peterson para cálculo de perdidas por efecto corona para razones de V/e_d hasta 2.4	26
2.10. Función de Peterson para cálculo de perdidas por efecto corona para razones de V/e_d hasta 21	26
2.11. Ejemplo de Jaula Corona cilíndrica	28
3.1. Definición del problema en el software (Elaboración propia).	38
3.2. Vista de un corte transversal del sector de medición de la jaula corona (Elaboración propia).	39
3.3. Densidad de Campo eléctrico en el espacio (Elaboración propia).	40
3.4. Zoom de la densidad de campo en las cercanías del conductor (Elaboración propia). .	40
3.5. Campo eléctrico en función de la distancia de separación entre el conductor y la jaula corona (Elaboración propia).	41

3.6.	Vista lateral del primer modelo realizado (Elaboración propia).	42
3.7.	Vista en diagonal del primer modelo realizado (Elaboración propia).	42
3.8.	Vista lateral del segundo modelo realizado (Elaboración propia).	43
3.9.	Vista en diagonal del segundo modelo realizado (Elaboración propia).	43
3.10.	Jaula Corona recién construida (Elaboración propia).	45
4.1.	Esquema circuital básico del modelo experimental (Elaboración propia).	46
4.2.	Modelo experimental utilizado para la realización de mediciones (Elaboración propia).	47
4.3.	Aislador de suspensión polimérico de 8 polleras.	48
4.4.	Anillo corona ocupado durante los ensayos.	49
4.5.	Disposición espacial del conjunto aislador-tensor-anillo	50
4.6.	Bases de madera para sostener a la jaula corona.	51
4.7.	Anillo de corona utilizado en puntas de pernos.	52
4.8.	Unión hecha de el material aislante TECHNYL.	53
5.1.	Resistencias shunt utilizadas durante las pruebas	55
5.2.	Corriente de fuga en función del tiempo en conductor de aluminio a 100 [kV] con $R_{sh} = 100$ [k Ω] (Elaboración propia).	56
5.3.	Acercamiento de pulso de corriente en conductor de aluminio para 100 [kV] con $R_{sh} = 100$ [k Ω] (Elaboración propia).	57
5.4.	Corriente de fuga en función del tiempo en conductor de cobre a 100 [kV] con $R_{sh} = 100$ [k Ω] (Elaboración propia).	58
5.5.	Acercamiento de pulso de corriente en conductor de cobre para 100 [kV] con $R_{sh} = 100$ [k Ω] (Elaboración propia).	58
7.1.	Imagen de referencia de jaula corona	66
7.2.	Imagen de referencia de jaula corona	67
7.3.	Imagen de referencia de jaula corona	67
7.4.	Clase del aislador	68
7.5.	Tensor ocupado durante los ensayos	69
7.6.	Conductor de cobre utilizado para las pruebas.	70
7.7.	Conductor de aluminio utilizado para las pruebas.	70
7.8.	Transformador utilizado en los ensayos	71
7.9.	Placa del transformador AEG utilizado en las pruebas.	72
7.10.	Corriente de fuga en conductor de aluminio usando $R_{sh2} = 4239$ [Ω] (Elaboración propia).	72

7.11. Acercamiento de pulso de corriente en conductor de aluminio usando $R_{sh1} = 4239$ [Ω] a 100 [kV] (Elaboración propia).	73
7.12. Corriente de fuga en conductor de cobre usando $R_{sh2} = 4239$ [Ω] (Elaboración propia).	73
7.13. Acercamiento de pulso de corriente en conductor de cobre usando $R_{sh1} = 4239$ [Ω] a 100 [kV] (Elaboración propia).	74

Resumen

El efecto corona es un fenómeno que se presenta en sistemas de alta tensión, generando pérdidas energéticas, ruido audible, radio interferencia, entre otros. Su estudio experimental permite comprender mejor su comportamiento y diseñar soluciones que lo mitiguen. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo diseñar y construir una jaula corona funcional, con la cual se pudieran medir y analizar distintos fenómenos asociados a este efecto, en particular la medición de corriente de fuga en la jaula.

Para ello, y apoyándose en la teoría existente, se diseñó y construyó una jaula corona de tipo cilíndrico, con un diámetro de 1[m]. Esta jaula está compuesta por tres secciones: dos secciones cilíndricas conectadas a tierra, de 45 [cm] de largo cada una, y una sección de medición de 120 [cm] de longitud. Además, se implementó un sistema de montaje que permitiera mantener el conductor lo más tenso posible durante los ensayos.

En las pruebas realizadas se utilizaron dos tipos de conductores, uno de aluminio y otro de cobre. El sistema fue energizado mediante una fuente de tensión en corriente alterna (AC), alcanzando hasta 100 [kV]. La corriente de fuga se midió mediante una resistencia shunt de 100000 [Ω], instalada en el exterior de la jaula y conectada a tierra. Las formas de onda de la corriente se observaron mediante un osciloscopio.

Los resultados obtenidos indican que la jaula corona construida es efectiva para la medición de corrientes de fuga, como se evidenció en las gráficas adquiridas. Estas formas de onda correspondieron a pulsos cuya magnitud varió desde decenas de μA para el conductor de aluminio hasta centenas de μA para el conductor de cobre. Asimismo, se comprobó que las tensiones de inicio de corona calculadas teóricamente mediante la fórmula de Peek fueron superiores a las tensiones observadas experimentalmente, observándose inicio de efecto corona a tensiones menores. Esta diferencia se atribuyó principalmente a las condiciones ambientales durante las mediciones, siendo la humedad relativa un factor determinante.

Otro aspecto relevante fue la diferencia observada en la magnitud de la corriente de fuga entre ambos conductores. El conductor de cobre presentó corrientes significativamente mayores que el de aluminio. Este resultado se atribuyó a las diferencias en el estado superficial de los materiales: mientras el cobre puede presentar microdefectos que intensifican localmente el campo eléctrico, el

aluminio desarrolla naturalmente una capa de óxido que puede actuar como una barrera pasiva, atenuando dichos efectos.

Capítulo 1

Introducción

Debido a la extensa y angosta geografía de Chile, el sistema de transmisión eléctrica adquiere una relevancia fundamental, constituyendo la columna vertebral del sistema eléctrico nacional. En esta analogía, las líneas de transmisión actúan como los "huesos" que conectan los distintos centros de consumo a lo largo del país. Por lo tanto, contar con un sistema de transmisión robusto y confiable es esencial para asegurar el desarrollo energético sostenible de Chile.

Un aspecto crítico al analizar el sistema eléctrico nacional es la diversidad de microclimas presentes en el territorio. Como puede observarse en la figura 1.1, en el norte, predominan climas áridos, incluyendo el desierto más seco del mundo; en el sur, se encuentran zonas lluviosas y húmedas; además, existen áreas costeras con alta salinidad y regiones cordilleranas caracterizadas por nieve y frío extremo. Estas variaciones climáticas imponen condiciones operacionales diversas a las líneas de transmisión, dependiendo de su ubicación geográfica [1].

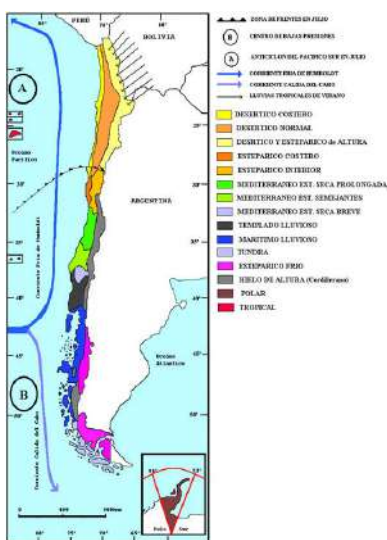


Figura 1.1: Microclimas de la República de Chile[2].

Uno de los principales problemas que afectan a las líneas de transmisión es el denominado efecto corona. Este fenómeno ocurre cuando los conductores, al estar expuestos al aire libre sin apantallamiento, generan un campo eléctrico suficientemente intenso para ionizar el aire circundante. La ionización produce un resplandor y un zumbido característico en la superficie del conductor. El efecto corona puede manifestarse en diversos componentes de la línea, como herrajes, amortiguadores y aisladores, especialmente en puntos donde el gradiente de potencial supera un valor crítico. Factores como el tamaño y estado de los cables, su separación y las condiciones atmosféricas presentes en la variedad de climas que existen en el país influyen en la aparición y magnitud del efecto corona [3].

Este fenómeno no deseado tiene múltiples consecuencias operativas y sociales. Entre las más significativas se encuentran [4]:

- Corona Losses (CL): El movimiento de carga en el espacio debido al efecto corona genera pérdidas energéticas conocidas como "pérdidas por corona".
- Audible Noise (AN): El zumbido producido por el efecto corona puede superar los niveles permisibles de ruido, causando molestias a las comunidades cercanas a las líneas de transmisión.
- Radio Interference (RI): El efecto corona también puede generar interferencias electromagnéticas que afectan las comunicaciones por radio .

En las figuras 1.2 y 1.3, es posible observar el resplandor causado por la ionización del aire, y que es señal directa del efecto corona.

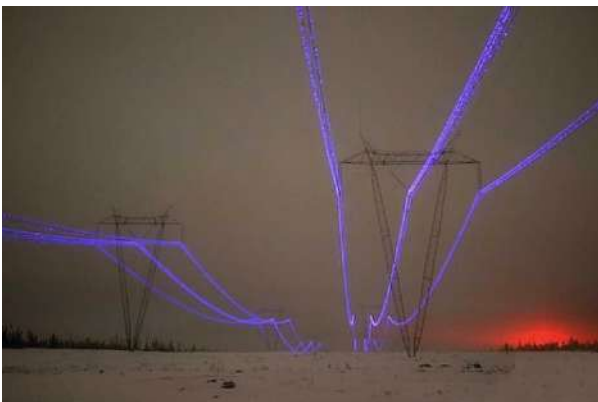


Figura 1.2: Efecto corona en líneas de transmisión [3].



Figura 1.3: Efecto corona en aisladores [5].

Actualmente en nuestro país, específicamente durante la noche los niveles de ruido provenientes de algunas líneas de transmisión debido al efecto corona superan los estándares permitidos, limite

cual viene estipulado por el Decreto Supremo número 38 del Ministerio del Medio Ambiente, que establece la Norma de Emisión de Ruidos Generados por Fuentes [6]. El límite provisto por la norma es de 45 [dB] desde las 21:00 hasta las 07:00 horas. Por estas razones se hace necesario que se modifiquen de alguna forma las líneas de transmisión con el fin de reducir el ruido audible y cumplir con la normativa vigente [6, 7].

Niveles Máximos Permisibles de Presión Sonora Corregidos (Npc) En (db)		
	de 7 a 21 horas	de 21 a 7 horas
Zona I	55	45
Zona II	60	45
Zona III	65	50
Zona IV	70	70

Tabla 1.1: Niveles máximos permisibles de presión sonora [6].

A partir de la tabla 1.1, se puede evidenciar los límites de ruido admisibles por zona, en este caso, las zonas que presentan 45 [db], se refieren a lugares de suelo residencial o y/o área verde.

Por estas razones mencionadas anteriormente es que se hace necesario contar con un elemento que permita hacer pruebas a un nivel más acotado y controlado. A raíz de lo mencionado, la jaula corona se plantea como una opción viable en temas de investigación para medir efecto corona e iniciar estudios para la posible reducción de este fenómeno. La jaula corona es típicamente un equipo de prueba de una sola fase en la que el conductor se encuentra centrado en una jaula enmallada conectada a tierra. De esta manera la jaula otorga seguridad tanto a personas como a equipos cuando se aplica tensión al conductor estudiado. Es posible probar varias configuraciones de conductores sin incurrir en los retrasos de tiempo y costos financieros si se utilizara una línea de prueba a gran escala. Es debido a esto que en el mundo se han utilizado estos equipos para estudiar los fenómenos producidos por el efecto corona (AN,RI y CL) en las líneas de transmisión [4, 8, 9, 10].

Actualmente, la Universidad Técnica Federico Santa María (USM) ya dispone de un equipo de estas características. La implementación de una jaula de efecto corona en la USM permitió, tanto a académicos como a estudiantes, la realización de estudios experimentales orientados a la reducción del efecto corona y sus consecuencias. Además, dado que la jaula puede ser utilizada con tensiones de corriente alterna (AC) y corriente continua (DC), su incorporación sería especialmente relevante en el contexto de la expansión de las líneas de transmisión en DC, como la proyectada línea de 500 kV Kimal-Lo Aguirre.

1.1. Objetivo General

Diseñar y construir una jaula corona de tipo cilíndrica para la generación y medición de fenómenos asociados al efecto corona.

1.2. Objetivos Específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica referente a los distintos diseños de jaula corona existentes, para definir de forma preliminar los parámetros constructivos de esta.
2. Realizar simulaciones computacionales en algún programa basado en elementos finitos para la definición de los parámetros constructivos y de operación de la jaula corona,
3. Construir la jaula corona según las especificaciones obtenidas a partir de la revisión bibliográfica y los resultados de las simulaciones realizadas, para realizar mediciones de los fenómenos asociados al efecto corona.
4. Evaluar el funcionamiento de la jaula corona por medio de mediciones de corriente de corona en condiciones controladas para descartar presencia de fallas.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Introducción al Efecto Corona

El efecto corona según Ref. [11], es una descarga eléctrica localizada que se produce cuando el campo eléctrico en la superficie de un conductor supera un valor crítico, provocando la ionización del aire circundante. Este tipo de descargas se presenta en campos eléctricos no uniformes, en zonas donde la intensidad del campo es elevada o cuando el área de los electrodos es considerablemente menor que la distancia que los separa.

Cuando el campo eléctrico o gradiente de potencial alcanza o sobrepasa la rigidez dieléctrica del aire, aproximadamente $30 \left[\frac{kV}{cm} \right]$ bajo condiciones normales de presión atmosférica, el aire circundante se ioniza, y se produce una descarga localizada conocida como descarga corona. Además del fenómeno de ionización, la descarga se acompaña de un halo luminoso característico en forma de corona, del cual proviene el nombre. Otros efectos asociados al fenómeno incluyen un zumbido perceptible, interferencias en señales de radio y televisión, y pérdidas de energía, todo ello en las cercanías de la región donde ocurre la descarga. Asimismo, el efecto corona genera ozono y, en presencia de humedad, ácido nitroso, el cual puede producir corrosión en los conductores cuando el fenómeno es muy intenso [12].

A elevados niveles de campo eléctrico en la superficie, complejos procesos de ionización toman lugar en el aire que rodea a las líneas de transmisión de alta tensión, las que resultan en la descarga corona. La física detrás de estos procesos es muy compleja y entender los procesos básicos involucrados es necesario para así entender el concepto de descarga corona. Es por eso que a continuación se procederá a explicar algunos de estos fenómenos, para poder así entender de donde se origina el efecto corona y sus características.

Con el fin de facilitar la comprensión, los procesos involucrados se clasificarán en dos categorías:

aquellos que favorecen el desarrollo de la descarga, y aquellos que la inhiben o dificultan.

2.1.1. Procesos favorables a la descarga

Foto-Ionización

La foto-ionización es el proceso en el que un átomo o molécula absorbe un fotón con suficiente energía y, como resultado, emite un electrón. La iniciación de este proceso a menudo requiere de fuentes de radiación externas, como la luz ultravioleta del sol, rayos cósmicos, etc. La condición para que este proceso suceda es que la energía del fotón sea al menos igual a la energía de ionización de la partícula gaseosa [12, 13]. El proceso de foto-ionización puede expresarse de la siguiente manera.



Donde :

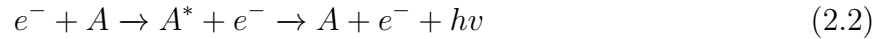
- A : Molécula irradiada
- hv : Fotón
- A^+ : Molécula ionizada positivamente
- e^- : Electrón

Ionización por colisión

La ionización por colisión o ionización por impacto de electrón, ocurre cuando una partícula que posee una alta energía cinética, en este caso el electrón, choca con un átomo o molécula neutra. A partir de este choque y de la energía suministrada por el electrón a la molécula, se crea una molécula ionizada positivamente y un electrón libre. La condición para que este proceso suceda es que la energía cinética de la partícula incidente, en este caso el electrón, sea igual o mayor que la energía de ionización de la molécula en la cual incide. Dependiendo de si el electrón posee o no la energía necesaria, se clasifican estos choques en elásticos o inelásticos. Si el choque es elástico, no ocurren cambios, es decir la molécula no se ioniza, y solamente el electrón pierde un poco de su energía interna. En cambio si el choque es inelástico, en el cual ocurren cambios de energía en la molécula neutra colisionada, pueden pasar dos situaciones:

- a) Excitación: Es cuando el átomo pasa a un estado de mayor energía interna debido al desplazamiento de un electrón a un orbital distinto al de origen. En este proceso, la molécula pasa a un estado inestable, debido a la cantidad de energía que tiene, por lo que para

relajarse, el átomo libera un fotón, debido al desplazamiento de su electrón al orbital de origen [12, 13, 14].



Donde:

- A*: Molécula inestable debido a la energía concentrada
- b) Ionización : En este caso, si el electrón posee una energía mayor que la del átomo neutro, la colisión tiene por efecto el desprendimiento de un electrón de la molécula neutra, quedando de esta manera, cargada positivamente, obteniendo como resultado un ion positivo [12, 13, 14].

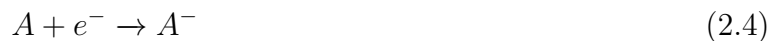


Además, los electrones liberados por el choque pueden ser acelerados mediante la presencia de un campo eléctrico y a su vez iniciar otros choques con otras moléculas, fenómeno conocido como ionización en avalancha. Este tipo de ionización es fundamental en algunos tipos de descarga por gases, como lo son las descargas de Townsend y descargas corona [12, 13, 14, 15].

2.1.2. Procesos desfavorables a la descarga

Enlace con molécula Neutra (Electron Attachment)

Este proceso sucede cuando un electrón, el cual posee poca energía, al chocar con un átomo neutro queda ligado a este, convirtiéndose en un ión negativo. Esta molécula cargada negativamente tiene menor movilidad que el electrón, de manera que a pesar de conservarse la carga, la descarga se tiende a mitigar [12, 13, 15].



Recombinación

En este proceso, el choque entre un electrón y un ión positivo, el cual no tiene la energía suficiente para producir alguno de los resultados descritos anteriormente, hace que la molécula absorba el electrón, volviéndose una partícula neutra y expulsando un fotón debido a la reacción, por lo que no se presentan descargas [12, 13, 14].



Los procesos antes descritos, ya sea que sean favorables o no a la descarga corona, pretenden ayudar a entender variados mecanismos que como su nombra lo indica, favorecen o inhiben el efecto corona y sus fenómenos. Por ejemplo, el conocer estos mecanismos de descarga puede ayudar a predecir con precisión el inicio de la descarga, también puede ayudar a entender la morfología y naturaleza de la descarga.

2.2. Mecanismos de la Descarga Corona

El proceso de descarga corona depende de la polaridad de la tensión aplicada y de la naturaleza de la corriente, distinguiéndose principalmente dos casos: corriente alterna (AC) y corriente continua (DC).

Como primer enfoque se estudiará el mecanismo de descarga corona para ambas polaridades (positiva y negativa) bajo HVDC.

2.2.1. Corona Positiva DC

Durante la iniciación, y en una región ligeramente por encima de ella, existe un pequeño volumen de espacio en el ánodo donde la intensidad del campo eléctrico es suficientemente alta como para provocar la ionización por colisión. Cuando un electrón libre es acelerado por el campo hacia el ánodo, se genera una avalancha electrónica. La nube de iones positivos producida como resultado de la avalancha actúa como una extensión del ánodo. Una segunda generación de avalanchas alcanza directamente tanto al ánodo como a la nube de iones positivos previamente creada. Este modo de descarga corresponde a lo que se denomina *streamers*.

A tensiones algo más elevadas, se forma una nube de iones negativos en las proximidades del ánodo, a medida que los *streamers* se vuelven más numerosos. La corriente correspondiente en el circuito de alta tensión se convierte entonces en una corriente cuasi-estacionaria. El pulso de corriente positiva está asociado a una sucesión de generaciones de avalanchas electrónicas que ocurren en la zona de ionización cerca del ánodo.

Si la tensión continúa aumentando, la nube de iones negativos en las cercanías del ánodo pierde estabilidad y es disuelta por violentos *streamers* de pre-ruptura, los cuales se manifiestan como pulsos de corriente de alta amplitud y forma irregular. Si el incremento de la tensión persiste, la ruptura dieléctrica del medio se hace inevitable [13, 14, 11, 16].

En la figura 2.1 se puede observar el desarrollo de las descargas corona positivas, mientras que en la figura 2.2, es posible observar los oscilogramas y fotografías de los distintos modos de corriente corona en DC.

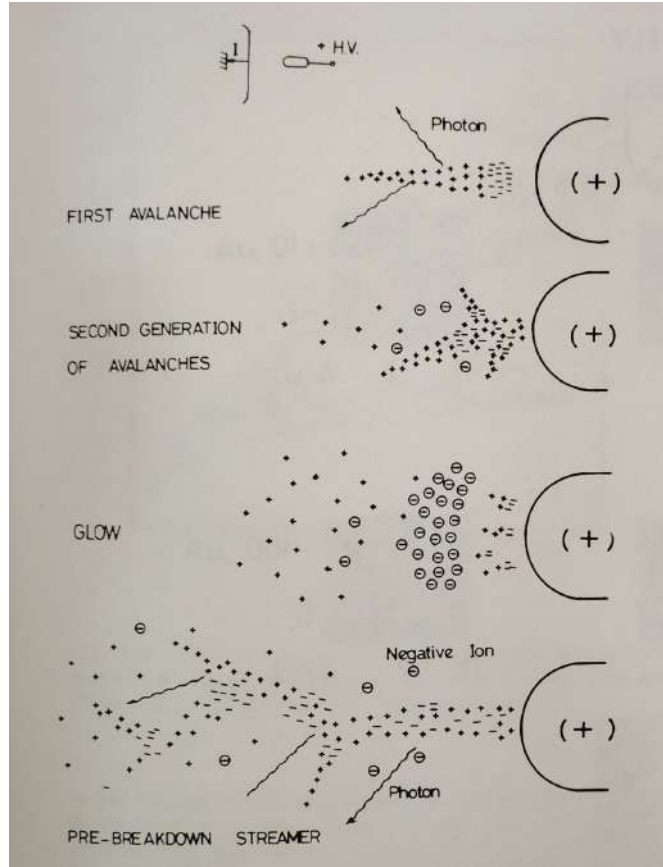


Figura 2.1: Desarrollo de la primera y las subsecuentes generaciones de avalanchas en descargas Corona Positivas [14].

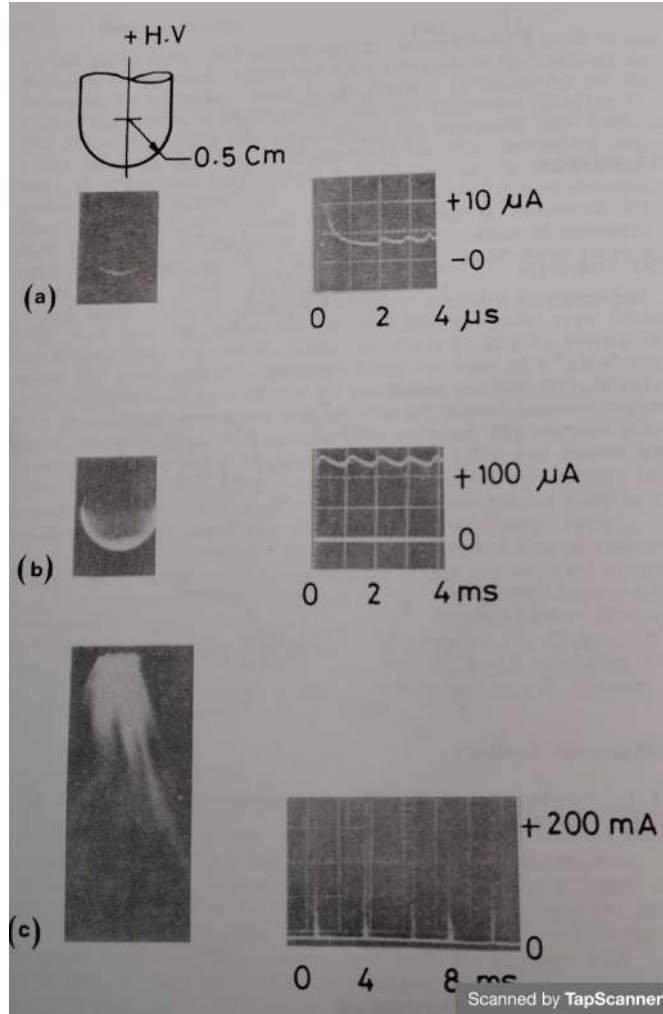


Figura 2.2: Fotografías y oscilogramas correspondientes a los distintos modos de corriente corona para DC positiva [14].

2.2.2. Corona Negativa DC

Durante la iniciación de la descarga, y en una región ligeramente superior a ella, la descarga corona en el cátodo presenta un modo pulsante y rápido conocido como *Trichel pulse corona*. Cada pulso de corriente corresponde a una avalancha electrónica principal que ocurre en la zona de ionización. En este caso, la zona de ionización se extiende desde la superficie exterior del cátodo hasta la región donde el campo eléctrico se debilita lo suficiente como para que la ionización por colisión ya no sea efectiva, dando lugar al fenómeno de captura de electrones por moléculas neutras (*electron attachment*). Superado un cierto punto, cada vez más electrones libres generados por la avalancha son capturados por las moléculas del gas, lo que da origen a una nube de iones negativos que se desplaza lentamente alejándose del cátodo. Durante el crecimiento de la avalancha electrónica, algunos fotones son irradiados desde el núcleo de la avalancha en todas direcciones, y mediante

el proceso de fotoionización pueden inducir la formación de avalanchas secundarias dirigidas desde el cátodo. El movimiento de electrones y de iones negativos alejándose del cátodo, junto con el desplazamiento de los iones positivos hacia este, corresponde a la corriente de los pulsos de descarga corona a través del circuito de alta tensión. Con un aumento de la tensión aplicada, la tasa de repetición de los pulsos de Trichel se incrementa hasta alcanzar un nivel crítico, a partir del cual la descarga corona negativa evoluciona hacia un modo constante conocido como *negative glow mode*. Si la tensión sigue aumentando, aparecen *streamers* de pre-ruptura, los cuales conducen finalmente a la ruptura dieléctrica [13, 14, 11, 16].

En la figura 2.3 se presentan algunas gráficas que ilustran el desarrollo de la avalancha electrónica en descargas corona negativas, mostrando la evolución de los distintos procesos involucrados. Además, en la figura 2.4 se muestra una imagen que reúne las fotografías y oscilogramas correspondientes a los diferentes modos de descarga corona negativa en DC a modo de ejemplificación.

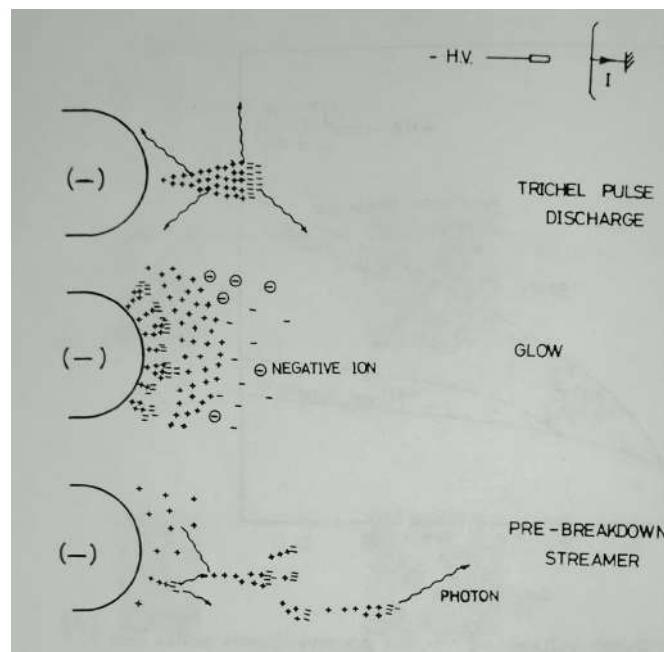


Figura 2.3: Desarrollo de la avalancha electrónica en descargas corona negativas [14].

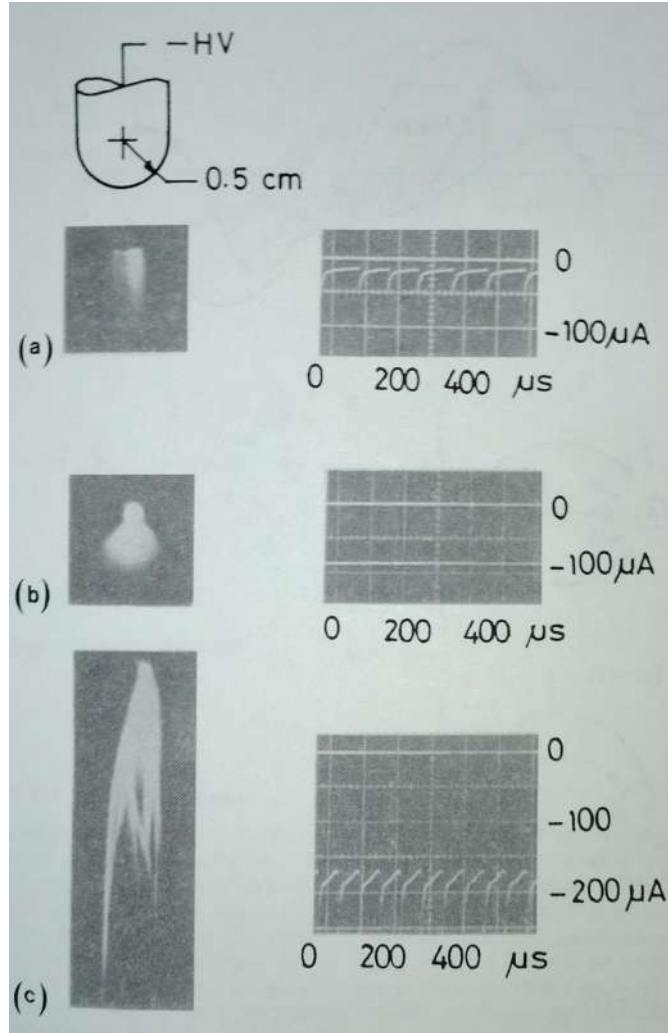


Figura 2.4: Fotografías y oscilogramas correspondientes a los distintos modos de corriente corona para DC negativa [14].

2.2.3. Corona AC

La diferencia básica entre el corona AC y DC, es el cambio periódico en la dirección del campo aplicado, y su influencia en la carga residual que se mantiene una vez ocurrida la descarga en cada uno de los ciclos. De este modo los *streamers* positivos pueden aparecer solo en un pequeño rango de tensión, seguido de un *positive glow*. También se pueden observar los *Trichel pulse* negativos y *negative glow*. Si la tensión aplicada tiene una magnitud adecuada dependiendo de la geometría del electrodo, se pueden observar ambos *glow* positivo y negativo y los corona streamers pueden ser observados en cada ciclo [13, 14, 11, 16].

En la figura 2.5, es posible observar los diferentes modos de descargas corona AC para distintas magnitudes de tensión y para ambos ciclos.

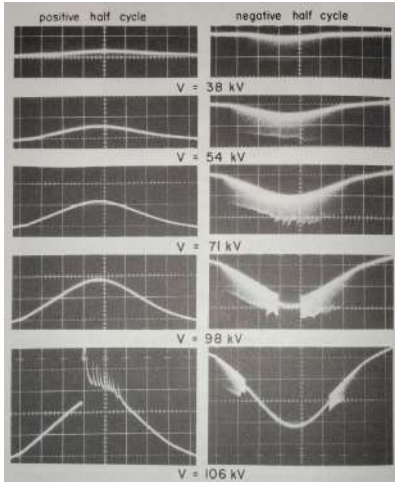


Figura 2.5: Modos Coronas típicos para AC [13].

2.3. Variables que influyen en el Efecto Corona

El fenómeno de la descarga corona depende en gran medida de las condiciones del entorno, así como de los parámetros físicos y eléctricos del sistema. Aunque su origen se encuentra en el incremento del campo eléctrico hasta niveles capaces de ionizar el medio circundante, la manifestación y las características del efecto varían considerablemente en función de diversas variables ambientales, geométricas y eléctricas. Comprender estos factores es fundamental no solo para predecir la aparición del efecto corona, sino también para lograr su correcta caracterización, tanto en condiciones controladas de laboratorio como en sistemas reales de transmisión de energía.

A continuación, se enumeran algunas de las variables más relevantes que influyen directamente en el efecto corona y sus consecuencias.

- Gradiente superficial
- Estado de la superficie del conductor
- Densidad relativa del aire
- Distancia entre electrodos
- Efecto del agua sobre el conductor

Prosiguiendo, se profundizará en los elementos listados anteriormente, explicando claramente cómo se relacionan con el efecto corona [12, 13, 14].

2.3.1. Gradiente superficial

Como se explicó anteriormente, la intensidad del campo eléctrico juega un papel fundamental en este fenómeno. Formalmente, se define el concepto de *gradiente superficial* como la intensidad de campo eléctrico presente en la superficie de un conductor [17]. Es importante destacar la estrecha relación entre el gradiente superficial y el gradiente de potencial eléctrico. El campo eléctrico se define como el negativo del gradiente del potencial eléctrico, lo que se expresa matemáticamente como $\mathbf{E} = -\nabla V$. A su vez, el gradiente superficial puede interpretarse como la componente tangencial a la superficie del gradiente de potencial.

Se sabe con anterioridad que en un campo eléctrico uniforme es necesario un gradiente superficial de aprox 29,8 [kV_{peak}/cm], bajo condiciones normales de presión y temperatura, las cuales son 25[°C] y 760 [mmHg] según Ref. [13], para producir la ionización del aire en la superficie del conductor. No obstante, la mera ionización de las moléculas del aire no implica necesariamente la formación de una descarga corona autosostenida. Para que el fenómeno corona se manifieste de forma visible y medible, es necesario que se produzca una multiplicación progresiva de cargas, es decir, una avalancha electrónica que permita el desarrollo continuo de la descarga. Por ello, el gradiente superficial requerido para la aparición efectiva del efecto corona debe ser mayor al campo de ionización inicial del aire, de modo que los portadores de carga puedan acumularse y mantenerse en el tiempo. En geometrías no uniformes, como conductores de pequeño radio o bordes agudos, este campo se alcanza más fácilmente, favoreciendo la formación del fenómeno [12, 13, 14].

De esta manera el gradiente superficial necesario para alcanzar las descargas corona en un conductor cilíndrico liso, se denomina como gradiente critico visual o gradiente de iniciación E_v . El valor de este gradiente indica que, en una determinada distancia desde la superficie del conductor, se ha alcanzado el nivel de ruptura necesario para iniciar el proceso de descarga y los fenómenos asociados al efecto corona [9, 12, 13, 18].

La siguiente ecuación formulada por F.W. Peek de manera experimental y empírica [19], ilustra una forma de obtener el gradiente de iniciación corona E_v en [kV_{peak}/cm].

$$E_v = g_0 \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{R}}\right) \quad (2.6)$$

Donde:

- g_0 : Gradiente critico disruptivo del aire, aproximadamente 29,8 [kV_{peak}/cm]
- R : radio del conductor, en cm.

Cabe destacar que el valor entregado por la fórmula definida por Peek, puede ser diferente del

valor real, debido a que la formula anteriormente presentada no toma en cuenta el estado de los conductores.

2.3.2. Estado de la superficie del conductor

Los cálculos referentes al gradiente superficial se realizan considerando conductores cilíndricos de superficie lisa y perfectamente pulida, con el mismo diámetro exterior que el conductor real. Sin embargo, debido a las imperfecciones que pueden presentar los conductores, como rayaduras, melladuras u otros daños, el gradiente efectivo o real resulta mayor al calculado idealmente. Además, debido a la concentración de carga en las zonas donde el conductor ha sufrido algún tipo de avería, el valor del gradiente crítico será ligeramente menor. Para mitigar este efecto, en la fórmula de Peek presentada en el apartado anterior, se introduce el factor m , denominado factor de corrección por el estado de la superficie del conductor, cuyo valor varía según las condiciones físicas del conductor en estudio [12].

A continuación, se presentan los valores que puede adoptar el factor m , dependiendo del estado superficial del conductor.

Característica del conductor	Valor de factor m
Conductor liso ideal	1,00
Conductor cableado nuevo y limpio	0,95
Conductor trenzado nuevo y limpio	0,9
Conductor cableado envejecido	0,70-0,80
Conductor tratado deficientemente	0,50-0,70
Conductor bajo lluvia, nuevo o envejecido	$\leq 0,60$

Tabla 2.1: Valor del coeficiente de estado de superficie del conductor m para distintas consideraciones [12].

2.3.3. Densidad relativa del aire

Otra variable importante que influye en la aparición del fenómeno corona es el impacto del ambiente sobre las líneas de transmisión. Tomando en cuenta la fórmula de Peek, se sabe que esta es válida bajo condiciones ambientales normales. Por lo tanto, si la densidad del aire varía debido a cambios en la presión o temperatura, se alteraría la rigidez dieléctrica del aire, lo que, a su vez, provocaría un cambio en el gradiente crítico.

Se sabe que la densidad del aire aumenta con la presión y disminuye con la temperatura. De esta forma, la fórmula que describe la densidad relativa del aire es la siguiente [13]:

$$\delta = \frac{273 + t_0}{273 + t} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (2.7)$$

Donde:

- t_0 : Temperatura de referencia (25 °C)
- p_0 : Presión de referencia (760 mmHg)

Además se tiene que el factor por corrección ambiental se toma como δ^k , y el valor del exponente k , varía entre 0,5 y 1.

De esta forma y tomando en cuenta los dos incisos anteriores (estado de la superficie del conductor y densidad relativa del aire), la fórmula de gradiente critico viene dada por:

$$E_c = g_0 \cdot \delta \cdot m \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot R}}\right) \quad (2.8)$$

2.3.4. Distancia entre electrodos

La distancia entre el conductor al que se le aplica la alta tensión y el plano de referencia, que puede ser otro conductor o la tierra, también influye en la intensidad del campo eléctrico. Para una configuración determinada, una mayor separación implica un menor campo eléctrico superficial, lo que dificulta la aparición de corona. Por el contrario, distancias pequeñas incrementan el campo eléctrico local, favoreciendo el inicio del fenómeno [13].

2.3.5. Efecto del agua sobre el conductor

Otra variable importante que influye en la aparición del fenómeno corona en conductores es el agua. En el caso de las líneas de transmisión expuestas a la intemperie, esto se refiere a la lluvia o llovizna, que puede formar una película de agua alrededor de la superficie del conductor. Sin embargo, debido al efecto de la gravedad, se forman gotas en la parte inferior de la superficie del conductor, lo que crea discontinuidades que actúan como nuevas fuentes de corona. Como resultado de estas discontinuidades, el gradiente de iniciación disminuye, lo que incrementa las pérdidas por corona y las interferencias [12].

2.4. Métodos para el cálculo del gradiente superficial de un conductor

Al aplicar tensión a los conductores de una línea de transmisión, se genera una distribución de cargas en la superficie del conductor, lo que da lugar a una distribución de campo eléctrico en

el espacio entre el conductor y la tierra. A frecuencias de 50/60 [Hz], el campo electromagnético generado puede considerarse como quasi estático, por lo que las componentes del campo eléctrico y magnético pueden considerarse independientes entre sí, permitiendo que los cálculos se realicen con base en campos estáticos [13].

El cálculo de la distribución de campo eléctrico en las cercanías de la superficie del conductor, como también en el espacio entre el electrodo y tierra, es un problema inherentemente complejo debido a ciertos problemas físicos que se pueden presentar en la realidad, como por ejemplo la proximidad de las torres, la superficie irregular del terreno, entre otras. De esta manera se hace necesario el realizar algunas simplificaciones y asumir ciertas condiciones, para de esta forma reducir la complejidad del problema.

Se asumen los siguientes puntos con el fin de reducir la dificultad del problema propuesto, en este caso, el cálculo de campo eléctrico, o gradiente superficial [12, 13].

- Una distancia equivalente arriba de tierra es asumida para cada conductor, la cual responde a la fórmula de $(H-2S/3)$, donde H es la altura entre el conductor y tierra y S es la flecha del conductor.
- Se asume que los conductores son superficies equipotenciales, con el plano de tierra manteniéndose a potencial cero.

2.4.1. Conductor aislado

Antes de proceder a configuraciones más complejas, se mostrará el caso de un conductor cilíndrico infinitamente largo de radio r_0 [m], en un espacio libre, al que se le aplica una tensión U [V]. El punto de potencial cero se asume a una distancia D [m] del conductor. Al aplicar la tensión, se produce carga en la superficie del conductor, la cual se distribuye uniformemente en esta superficie y a lo largo del conductor. Por lo tanto la distribución de carga puede ser representada por una línea de carga uniforme, la cual tiene una densidad de carga de λ [C/m], localizada en el centro del conductor. Se hace necesario determinar la relación entre la tensión U y la densidad lineal de carga λ y también el vector de campo eléctrico a cualquier punto a una distancia radial r desde el centro del conductor. Esto puede ser resuelto mediante la aplicación de la Ley de Gauss en su forma integral [13, 14].

$$\epsilon_0 \oint_{surface} E \cdot da = \oint_{volume} \rho dv \quad (2.9)$$

Operando la fórmula anteriormente presentada, se puede expresar esta de la siguiente manera, considerando que la superficie cerrada corresponde a un cilindro concéntrico con el conductor:

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (2.10)$$

Relacionando la expresión encontrada anteriormente con la definición de campo eléctrico, dado por la siguiente formula, se tiene que :

$$E = -\nabla\phi = -\frac{d\phi}{dr}u_r \quad (2.11)$$

Integrando con respecto a r desde D hasta r_0 , el potencial obtenido queda de la siguiente forma:

$$U = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_D^{r_0} \frac{1}{r} dr = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r_0} \quad (2.12)$$

Se puede notar que el potencial del conductor depende de la distancia D. Si por ejemplo, el conductor está dispuesto dentro de un cilindro aterrizado infinitamente largo de radio R [m], entonces el potencial y el campo eléctrico del conductor viene dado por:

$$U = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R}{r_0} \quad (2.13)$$

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r_0}} \quad (2.14)$$

2.4.2. Conductor aislado encima de tierra

El siguiente caso a considerar es el de un conductor infinitamente largo con un radio r_0 y localizado a una altura h por encima del plano de tierra, como se muestra en la figura 2.6. Si se eleva el potencial del conductor a un valor U, y la distancia de la altura es mucho mayor que el radio del conductor ($h \gg r_0$), entonces la carga en el conductor puede ser asumida como uniformemente distribuida a lo largo de la superficie y representada como una distribución lineal de carga (λ) en su centro. Usando la teoría de imagen, el plano de tierra puede ser reemplazado por una imagen del conductor ubicada a una distancia h por debajo del plano de tierra. El potencial de este conductor ficticio es -U y su densidad lineal de carga es $-\lambda$ en su centro [12, 13].

A modo de ejemplificación del método explicado se presenta la figura 2.6:

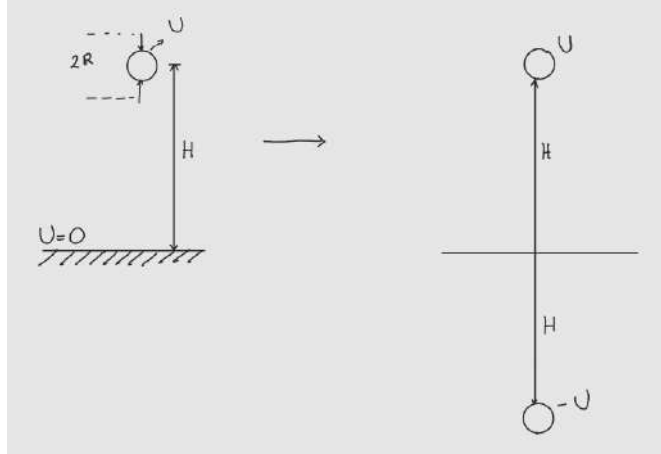


Figura 2.6: Método de imágenes para el cálculo de gradiente superficial (Elaboración propia).

Usando las ecuaciones ya mencionadas anteriormente, se obtiene el valor de potencial para este tipo de configuración:

$$U = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r_0} \quad (2.15)$$

También se puede obtener el valor de gradiente superficial del conductor como:

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r_0} = \frac{U}{r_0 \ln \frac{2h}{r_0}} \quad (2.16)$$

Este método de imagen también puede ser usado en configuraciones donde haya más de un conductor en paralelo. Estas son representadas por n conductores cilíndricos infinitamente largos de radio r_1, r_2, \dots, r_n , puestos en paralelo entre ellos y a alturas h_1, h_2, \dots, h_n , sobre el plano de tierra. Estos poseen potenciales de U_1, U_2, \dots, U_n y cada uno de estos conductores posee una distribución de carga lineal $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ localizadas en el centro de los n conductores. Las imágenes de estos conductores se sitúan por debajo del plano de tierra y poseen las mismas distancias que sus contrapartes, pero el potencial aplicado y la densidad de carga son negativas.

A raíz de esto se pueden diferenciar los coeficientes de potencial propio y mutuo de la siguiente manera:

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i}, k = 1, 2, \dots, n \quad (2.17)$$

$$p_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}}, k = 1, 2, \dots, n, k \neq m \quad (2.18)$$

Haciendo uso de la superposición, el potencial total debido a los n conductores simples, puede escribirse de la siguiente forma:

$$U_i = p_{i1} \cdot \lambda_1 + \dots + p_{ij} \cdot \lambda_j + \dots + p_{in} \cdot \lambda_n \quad (2.19)$$

Con $i = 1, 2, \dots, N$

Este conjunto de ecuaciones, puede ser expresado de manera matricial de la siguiente forma:

$$[P][\lambda] = [U] \quad (2.20)$$

De esta forma es posible resolver la ecuación dada anteriormente para las densidades lineales de carga ante cualquier potencial dado en los conductores. Por lo que el campo eléctrico en la superficie del conductor E_i , en cualquier conductor i puede ser calculado como:

$$E_i = \frac{\lambda_i}{2\pi\epsilon_0 r_i} \quad (2.21)$$

El método de cálculo descrito anteriormente, puede ser aplicado para líneas de transmisión AC y DC, la diferencia radica en el potencial, puesto que para líneas DC, los términos de U_i son constantes, por lo que la resolución de las ecuaciones matriciales es más sencilla. En cambio para líneas de transmisión AC, los potenciales aplicados son fasores que tienen diferente fase relativa y posiblemente también tengan diferentes valores RMS, por lo que el cálculo se vuelve más complejo [12, 13, 14].

Los métodos explicados anteriormente son para cálculos de conductores simples. A continuación se mostrará el método para conductores de haz.

2.4.3. Método de Markt y Mengele para un haz de conductores

Markt y Mengele [12, 13, 20], fueron los primeros que sugirieron una solución aproximada para el campo eléctrico de un haz de n conductores aislados. Considérese la figura 2.7, que representa a un haz de n conductores.

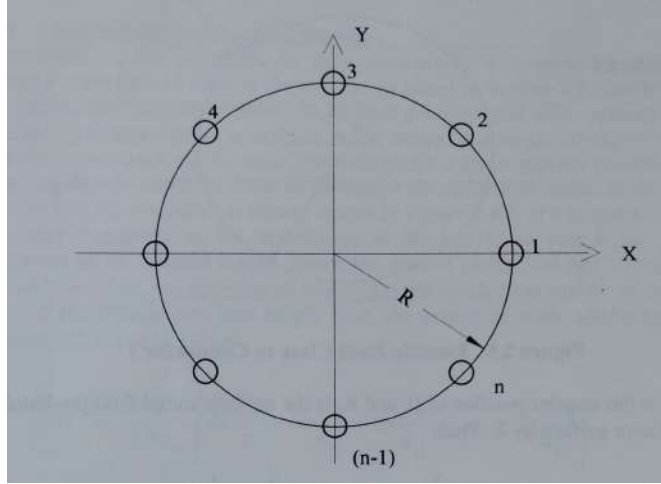


Figura 2.7: Distribución de sub-conductores en un haz circular [13].

Se requiere determinar la distribución de campo eléctrico alrededor de cada sub-conductor, asumiendo que cada uno de estos tiene una densidad de carga lineal λ , la cual está localizada en el centro de estos sub-conductores.

Para la realización de este método es razonable explicar primero, lo que se denomina como *Radio equivalente del haz*, el cual se define como el radio de un único conductor que presenta la misma capacitancia, o la misma carga total para una determinada tensión aplicada, que la que tendría el haz de conductores [13]. Se asume que el haz de n conductores mostrada en la figura 2.7, están a una distancia h , la cual es mucho mayor en comparación a las dimensiones del haz, por lo que puede considerarse como un haz de conductores aislado sobre el plano de tierra. Además se le aplica un potencial U . En estas condiciones, el potencial de cada sub-conductor puede calcularse en términos de la carga por unidad de longitud λ en el centro de cada conductor, utilizando las ecuaciones mencionadas en los incisos anteriores.

$$U = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[\ln \frac{2h}{r} + \ln \frac{2h}{d_{21}} + \ln \frac{2h}{d_{31}} + \dots + \ln \frac{2h}{d_{n1}} \right] \quad (2.22)$$

Donde $d_{21}, d_{31}, \dots, d_{n1}$ son las distancias entre los centros de los conductores 2, 3, ..., n con el conductor 1 respectivamente. Es posible simplificar la fórmula anterior de la siguiente forma:

$$U = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{(2h)^n}{(r \cdot d_{21} \cdot d_{31} \cdot \dots \cdot d_{n1})} \quad (2.23)$$

Las distancias inter conductores pueden ser expresadas en términos del radio del haz como:

$$d_{21} = 2R \sin\left(\frac{\pi}{n}\right); d_{31} = 2R \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right); \dots d_{n1} = 2R \sin\left(\frac{(n-1)\pi}{n}\right) \quad (2.24)$$

Reemplazando las distancias encontradas anteriormente en la fórmula de potencial, se obtiene lo siguiente:

$$U = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{(2h)^n}{[n \cdot r \cdot (R)^{n-1}]} \quad (2.25)$$

Sabiendo que la densidad de carga total λ_t viene dada por la multiplicación de la densidad lineal de carga por la totalidad de sub-conductores, la capacitancia del haz viene dada por la siguiente relación:

$$C_b = \frac{\lambda_t}{U} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{[n \cdot r \cdot (R)^{n-1}]^{\frac{1}{n}}}} \quad (2.26)$$

Por lo tanto, el radio equivalente viene dado por:

$$r_{eq} = [n \cdot r \cdot (R)^{n-1}]^{\frac{1}{n}} \quad (2.27)$$

Conocido el concepto de radio equivalente y su obtención, el método estudiando en esta sección puede enumerarse en tres pasos a seguir [12].

1. El haz de conductores es reemplazado por un único conductor de radio r_{eq} .
2. Con el haz representado por un único conductor equivalente, se procede a calcular la densidad de carga total (λ_t), mediante el método de conductor aislado encima de un plano de tierra.
3. Conocida la densidad de carga total, se procede a calcular el gradiente promedio de cada sub-conductor, de la siguiente forma.

$$E_a = \frac{\lambda_t}{n} \cdot \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \quad (2.28)$$

4. El gradiente superficial máximo para el haz de conductores es entonces determinado por:

$$E_m = E_a \cdot [1 + (n - 1) \frac{r}{R}] \quad (2.29)$$

Se debe tener en cuenta que las expresiones dadas anteriormente sirven para conductores de una sola hebra, o conductores sólidos. A continuación se presenta el caso para los conductores hechos a partir de hebras [13].

Tomando las ecuaciones anteriores se tiene que para un conductor hecho de hebras, el gradiente superficial viene expresado por la siguiente relación:

$$E(\theta) = E_m \cdot [1 + \frac{r_h}{R} \cos(\theta)] \quad (2.30)$$

Donde:

- r_h = radio de la hebra
- R: radio medio del conductor
- θ : corresponde al ángulo sobre la periferia del conductor

La figura 2.8 representa un conductor hecho de hebras y que tiene directa relación con la fórmula anterior se presenta a continuación:

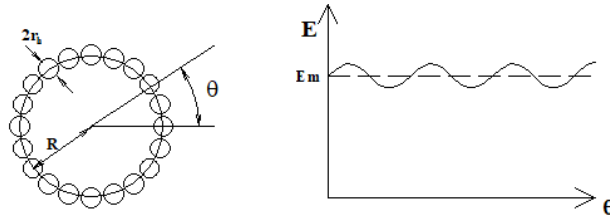


Figura 2.8: Variación periférica del campo en conductor cableado [12].

2.5. Métodos para el cálculo de pérdidas corona

Para el cálculo de perdidas se utilizan diferentes métodos, los cuales se diferencian principalmente por el tipo de conductor de la línea en cuestión:

2.5.1. Método de Peek

F.W.Peek mediante observaciones empíricas desarrolló fórmulas para el estudio cuantitativo de este fenómeno en particular [19]. Usó a modo de estudio una configuración particular, el cual fueron cilindros paralelos de superficie lisa. La fórmula obtenida por Peek tiene unidades de kW/km/fase y queda expresada de la siguiente forma:

$$P_{loss} = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{R}{D}} \cdot (V - V_d)^2 \cdot 10^{-5} \left[\frac{kW}{km} \right] \quad (2.31)$$

Donde:

- δ : Densidad relativa del aire
- f: Frecuencia del sistema, en Hz
- R: Radio del conductor, en cm.

- D: Distancia efectiva entre fases, en cm.
- V: Tensión efectiva entre fases, en kV.
- V_d : Tensión efectiva critica disruptiva, en kV.

La fórmula de Peek para pérdidas corona tiene la limitación de que solo puede ser usada para un único conductor por fase y no toma en cuenta condiciones climáticas adversas[12].

2.5.2. Método de Peterson

En este procedimiento, se calcula primero la tensión característica de la línea por fase (e_d), luego, se calcula la razón entre la tensión por fase de servicio y la tensión característica de la línea, con esta última se calcula un factor (ϕ), que se obtiene por parte de unas gráficas, para luego ocupar la ecuación de Peterson para perdidas corona [12, 13, 21].

Para mejorar el entendimiento acerca de este método se dividirá en etapas.

Primera etapa: Cálculo de e_d

Para el cálculo de la tensión característica por fase (e_d) existen tres casos importantes.

1. Conductores redondos de superficie lisa y limpia:

$$e_d = 48,6 \cdot m \cdot \delta^{\frac{2}{3}} \cdot R \cdot \log_{10}\left(\frac{D}{R}\right) \quad (2.32)$$

Donde:

- R: Radio del conductor, en cm.
- D: Distancia entre fases, en cm.
- δ : Densidad relativa del aire
- e_d = Tensión característica de la línea por fase [kV]

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

$$e_d = 48,6 \cdot m \cdot \delta^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{[\log_{10}\left(\frac{D}{c \cdot R_h}\right) + (n_h - 1) \cdot \log_{10}\left(\frac{D}{R - c \cdot R_h}\right)]}{\frac{1}{c \cdot R_h} + \frac{n_h - 1}{2 \cdot (R - c \cdot R_h)}} \quad (2.33)$$

Con:

$$c = 1 - \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n_h}\right)}{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n_h}} \quad (2.34)$$

Donde:

- n_h : Número de hebras en la capa exterior
- R_h : Radio de hebra en la capa exterior, en cm.
- R : Radio medio del conductor, en cm.

3. Para un cable que tiene 6 hebras en su capa exterior.

$$e_d = 35,47 \cdot m \cdot \delta^{\frac{2}{3}} \cdot R \cdot [\log_{10}\left(\frac{D}{R}\right) + 0,0677] \quad (2.35)$$

Con respecto a los valores de m , se entrega la siguiente tabla:

Condiciones	Valores de m
Para condiciones comunes	0,87-0,90
Para conductores no lavados	0,67-0,74
Para conductores lavados con un disolvente de grasa	0,912-0,93
Para conductores cepillados con un una escobilla de alambre	0,885
Pulido	1
Conductores arrastrados y sucios con polvo	0,72-0,75
Después de 5 meses expuestos a la acción atmosférica	0,945
Sometido a la acción atmosférica, humedad baja de día	0,92
Sometido a la acción atmosférica, humedad baja de noche	0,78

Tabla 2.2: Valores de m para el cálculo de la la tensión característica de línea [12].

Segunda etapa: Determinación de ϕ

Para la determinación del parámetro ϕ , primero se busca la razón entre V y e_d . Con este valor se ingresa a unas gráficas propuestas por Peterson, las cuales se muestran en las figuras 2.9 y 2.10.

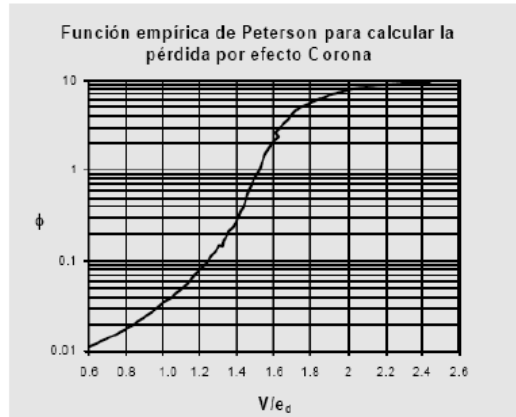


Figura 2.9: Función de Peterson para cálculo de perdidas por efecto corona para razones de V/e_d hasta 2.4 [21].

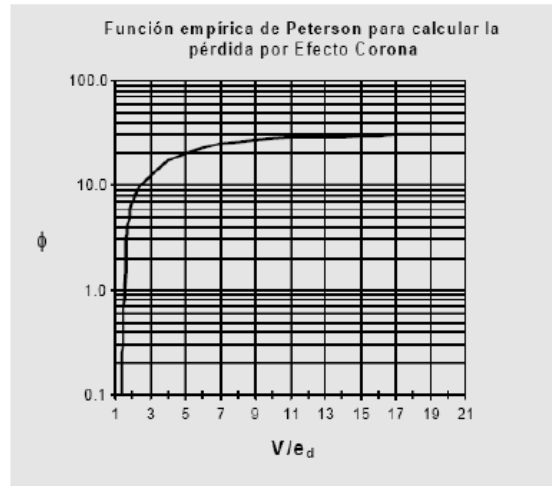


Figura 2.10: Función de Peterson para cálculo de perdidas por efecto corona para razones de V/e_d hasta 21 [21].

Tercera etapa: Perdidas por Corona

Obtenido el valor del parámetro ϕ a partir de las gráficas de la segunda etapa, se procede a calcular las perdidas corona por medio de la fórmula determinada por Peterson.

$$P_{loss} = \frac{20,95 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot V^2}{(\log_{10}(\frac{D}{R}))^2} \cdot \phi \quad (2.36)$$

Donde:

- P_{loss} : Potencia de pérdida por corona, en kW/km/fase.
- f : Frecuencia del sistema, en Hz
- V : Tensión de servicio, en kV efectivo fase-neutro.

El método de Peterson es aplicable solo para el caso de un conductor por fase y entrega mejores aproximaciones en el caso de conductores de más de una pulgada de diámetro.

2.6. Jaula Corona

Una vez comprendidos algunos conceptos referentes al fenómeno corona explicados en los incisos anteriores de este marco teórico, es razonable introducir el tema principal de esta memoria: la jaula corona y sus características.

En una primera etapa de investigación, no resulta económico construir varios kilómetros de líneas de transmisión y cambiar los conductores frecuentemente para estudiar el efecto corona en conductores de distintos tamaños. Por esta razón, la construcción de líneas cortas y jaulas para la investigación del efecto corona en alta tensión se ha aumentado en uso en los últimos años. Comparadas con las pruebas en líneas reales, las pruebas en jaulas son más convenientes y económicas [4, 18, 22].

Una jaula corona es un dispositivo experimental diseñado para estudiar el fenómeno del efecto corona en condiciones controladas de laboratorio. Su configuración geométrica, habitualmente formada por un conductor cilíndrico central rodeado por una superficie conductora externa (de forma cilíndrica o en forma de malla), permite simular la distribución de campo eléctrico que se presenta en sistemas reales como líneas aéreas de transmisión. Esta disposición genera un campo eléctrico radial que puede ser analizado de forma teórica y empírica, lo que facilita la determinación de la tensión de inicio del efecto corona, la corriente asociada al proceso de ionización, y las pérdidas energéticas vinculadas al mismo. El uso de jaulas corona es especialmente relevante en la validación de modelos como el de Peek, en la calibración de sensores, y en la caracterización de los factores geométricos y ambientales que afectan el inicio y desarrollo del efecto corona [13, 11]. A través de este sistema se pueden medir variables clave como el gradiente eléctrico superficial, corriente de fuga, y las pérdidas por corona, permitiendo una mejor comprensión y control del fenómeno en sistemas de alta tensión. Un ejemplo de jaula corona cilíndrica, puede verse en la figura 2.11:

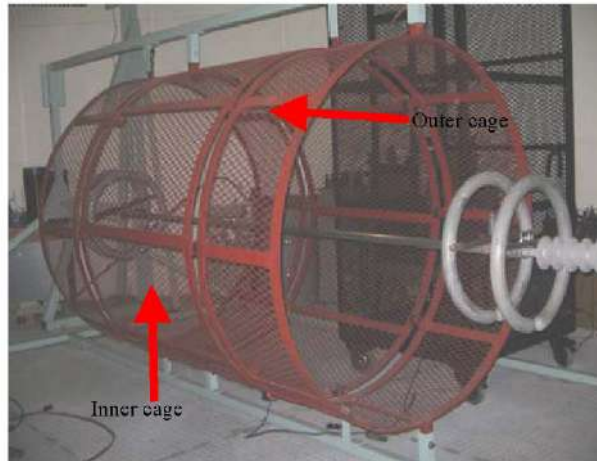


Figura 2.11: Ejemplo de Jaula Corona cilíndrica [18].

2.6.1. Principio de funcionamiento

La jaula opera bajo el principio de generar un campo eléctrico controlado entre un conductor y una superficie conductora de referencia, replicando de forma a escala y segura las condiciones presentas en líneas aéreas de alta tensión energizadas. Pueden ser construidas usando dos configuraciones principales, la primera siendo de sección cuadrada, y la segunda configuración, la cual fue la realizada para esta memoria, que consiste en un electrodo de forma cilíndrica (conductor) suspendido concéntricamente dentro de un cilindro metálico, formando una especie de condensador cilíndrico. La configuración explicada anteriormente permite que el campo eléctrico se distribuya de manera radial , cuya intensidad depende de la tensión aplicada y de la geometría del sistema [4, 18, 22].

La finalidad del montaje de la jaula corona es iniciar controladamente el efecto corona en la superficie del conductor, permitiendo de esta manera su observación, análisis y mediciones.

Este diseño permite la energización mediante fuentes de tensión en corriente alterna (AC) y corriente continua (DC), lo que posibilita la observación comparativa de las diferencias que presenta el fenómeno de descarga corona bajo sollicitaciones de distinta naturaleza. La configuración geométrica adoptada facilita la estimación precisa de la distribución del campo eléctrico, tanto a partir de expresiones analíticas derivadas de la ley de Gauss y del potencial electrostático en coordenadas cilíndricas, como de expresiones empíricas, tales como las formuladas por F. W. Peek. En este contexto, la jaula corona se establece como una herramienta experimental idónea para la validación de modelos teóricos y el estudio sistemático del efecto corona, proporcionando un entorno controlado que permite replicar y analizar las condiciones presentes en sistemas reales de

transmisión de energía.

Con respecto a la precisión del sistema, este radica en la capacidad para generar un campo eléctrico lo más homogéneo y simétrico posible en torno al conductor, minimizando los efectos de borde y perturbaciones externas.

2.6.2. Criterios de diseño geométrico de la jaula

Respecto a los parámetros de diseño geométrico de la jaula, se pueden destacar tres aspectos fundamentales de construcción: el diámetro de la jaula, la longitud del sector de medición y la longitud de las secciones de aterrizamiento.

Con el objetivo de garantizar un diseño adecuado y funcional de la jaula corona, a continuación se exponen los criterios técnicos y prácticos que guiaron la selección de sus principales parámetros geométricos. Se busca así justificar cada elección en función de los requerimientos experimentales, las limitaciones constructivas y las condiciones operativas previstas para el estudio del fenómeno corona.

Diámetro de la jaula

De acuerdo con lo expuesto en [22], el criterio de diseño relacionado con el diámetro de la jaula corona se basa en el comportamiento de los iones una vez que se inicia la descarga corona en el conductor. Para reproducir de manera precisa la distribución de los gradientes de potencial eléctrico en torno a la superficie del conductor, es fundamental que los iones generados durante el fenómeno no alcancen las paredes de la jaula. Por lo tanto, se debe garantizar un margen de separación adecuado. Bajo este principio, el diámetro de la jaula debe ser, como mínimo, dos veces la suma de los radios de los haces presentes —en caso de existir— y del máximo desplazamiento iónico previsto.

En el caso de la descarga corona en corriente alterna (AC), los iones generados no logran desplazarse significativamente lejos de los haces de conductores, lo que establece un límite al desplazamiento iónico máximo. Si dichos iones llegaran a alcanzar las paredes de la jaula, la distribución del gradiente eléctrico superficial se vería alterada respecto de la que se presenta en líneas de transmisión reales, lo que comprometería la validez de los resultados experimentales obtenidos.

La fórmula que gobierna la elección del diámetro de la jaula viene en función del radio y se expresa de la siguiente manera:

$$R_{min} = 2 \cdot (r_0 + d)[m] \tag{2.37}$$

Donde:

- R: Radio de la jaula corona, en [m].
- r_0 = Radio del conductor, en [m].
- d: Distancia iónica máxima, en [m].

Teniendo en consideración esta fórmula es posible encontrar el radio mínimo de la jaula para la cual las mediciones realizadas quedarían validadas.

Largo de la sección de medición.

Tal como se observa en la figura 2.11, la jaula corona se compone de una sección de medición y dos secciones más pequeñas de aterrizamiento. Según Ref. [22], para la sección de medición existen dos requisitos fundamentales. El primero es que el gradiente eléctrico superficial del conductor en esta sección sea uniforme. El segundo es que las magnitudes generadas por el efecto corona puedan medirse con la precisión requerida por los instrumentos, garantizando así la confiabilidad de los datos obtenidos.

Para la longitud de la sección de medición no existe un estándar definido. No obstante, esta debe ser lo suficientemente extensa como para garantizar la precisión de las pruebas realizadas, y su valor suele determinarse en función de la experiencia acumulada en estudios previos.

En el artículo [23], se sugiere que el largo de la sección de medición debe ser de 3 a 5 veces el lado de la sección transversal de la jaula para la precisión de las mediciones.

Largo de la sección de aterrizamiento.

Con respecto a la sección de aterrizamiento, según Ref. [22], su longitud depende en gran medida de la curvatura del conductor al ser tensado entre ambos extremos. En consecuencia, mientras mayor sea esta curvatura, mayor deberá ser la longitud de dicha sección. Al igual que en el caso de la sección de medición, no existe una fórmula específica que rijas este parámetro; por ello, se optará por una distancia que se adecúe a la curvatura observada, procurando tensar el conductor lo máximo posible para minimizar los efectos no deseados en sus extremos. Asimismo, se considerará el largo elegido para la sección de medición con el fin de establecer una proporción adecuada.

2.6.3. Análisis del campo eléctrico en la jaula corona

El análisis del campo eléctrico en la jaula corona es fundamental para comprender el comportamiento del fenómeno de descarga corona y predecir las condiciones para su iniciación.

En una configuración de cilindros concéntricos, como la que constituye una jaula corona cilíndrica, el campo eléctrico tiene un comportamiento radial en condiciones ideales y es inversamente proporcional al radio del conductor. La expresión que determina el campo eléctrico se muestra a continuación:

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} [kV/cm] \quad (2.38)$$

Donde:

- $E(r)$: Intensidad de campo eléctrico en punto r
- U : Tensión impuesta al conductor
- r_0 : Radio del conductor interior
- R : Radio del electrodo exterior (jaula)

La máxima intensidad de campo eléctrica ocurre en la superficie del conductor, por lo tanto $r=r_0$. De esta manera, este campo es el que debe compararse con el gradiente superficial crítico para ver si se cumple la condición de inicio de corona. Este valor de campo crítico va a depender de distintos factores y para condiciones normales de presión y temperatura tiene un valor aproximado de 30 [kV/cm]. Si se encontrara en otras condiciones climáticas, es posible usar el factor de densidad relativa para compensar este valor.

A través de la fórmula de campo eléctrico, es posible también obtener el valor de la tensión de iniciación corona [15], siendo posible calcularla de la siguiente forma:

$$U_0 = E_0 \cdot r_0 \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) \quad (2.39)$$

Donde:

- U_0 : Tensión de iniciación corona, en kV.
- E_0 : Gradiente superficial crítico, en kV/cm.
- r_0 : Radio para el cual se consigue el gradiente superficial crítico.

Esta expresión es especialmente útil para diseñar pruebas experimentales, ya que permite estimar a qué tensión se espera observar el fenómeno de forma visible o medible. Además, estos resultados pueden compararse con modelos empíricos como el de Peek, quien introdujo un factor de corrección por rugosidad superficial y propuso expresiones específicas para líneas aéreas.

2.6.4. Condiciones de prueba y medición en la jaula corona

La validez de los resultados obtenidos en experimentos de efecto corona dentro de una jaula depende de forma directa de las condiciones bajo las cuales se llevan a cabo las pruebas. Estas condiciones deben ser cuidadosamente controladas para asegurar la reproducibilidad, precisión y representatividad del fenómeno observado. Las principales variables a considerar incluyen el tipo de tensión aplicada, las condiciones ambientales, la instrumentación de medición y los criterios de detección del inicio de la descarga.

Desde el punto de vista eléctrico, el sistema debe ser alimentado por una fuente de alta tensión capaz de entregar niveles adecuados de alta tensión alterna o continua, dependiendo del tipo de estudio. En particular, en el momento de probar el funcionamiento de la jaula corona, se usaron distintas fuentes de tensión en corriente alterna. Debido a la utilización de tensión AC el comportamiento del campo eléctrico y de la ionización se repite en cada ciclo, haciendo necesario observar el fenómeno de forma cíclica.

Las condiciones atmosféricas tienen una influencia directa sobre la formación del efecto corona. Variables como la temperatura, la presión atmosférica y, en menor medida la humedad relativa, afectan el valor del gradiente superficial crítico requerido para iniciar la ionización del aire. Para tener un control más riguroso, es necesario medir estas variables durante cada prueba, y aplicar correcciones al valor de la tensión de iniciación utilizando el factor de densidad relativa del aire (δ). Este factor permite ajustar los resultados a condiciones de referencia normalizadas, facilitando la comparación con modelos teóricos y otros ensayos [13, 14].

En cuanto a la instrumentación de medición, uno de los parámetros más importantes a registrar es la corriente de corona. Esta puede ser medida conectando la jaula a tierra a través de un amperímetro de alta sensibilidad o mediante una resistencia shunt, permitiendo registrar la corriente de fuga inducida por la ionización del aire. Alternativamente, se pueden utilizar sensores de campo, cámaras UV, o sonómetros para detectar los efectos luminosos y acústicos asociados al inicio de la [18].

Para asegurar que la descarga corona se produce únicamente en la región de medición del sistema (cilindro central), es fundamental mantener la alineación coaxial entre el conductor y la jaula, así como también minimizar cualquier punto ajeno al conductor que pueda causar in-

homogeneidad al sistema. Esta condición se logra mediante el uso de aisladores, los cuales sirven de soporte para centrar el conductor.

2.6.5. Ventajas, limitaciones y aplicaciones de la jaula corona

El uso de jaulas corona como herramientas de ensayo y caracterización del efecto corona presenta una serie de ventajas prácticas y metodológicas, que las han convertido en un recurso ampliamente utilizado en laboratorios de alta tensión por todo el mundo. Entre sus principales beneficios destaca la posibilidad de reproducir condiciones controladas que simulan con alta fidelidad el comportamiento del campo eléctrico en configuraciones reales, como líneas aéreas de transmisión, pero en un entorno reducido y seguro. Esta capacidad de aislamiento y simplificación permite analizar en detalle las variables que afectan el inicio del fenómeno de ionización y descarga, como la geometría del conductor, la tensión aplicada, la presión atmosférica y la humedad.

Otra ventaja importante es la posibilidad de realizar mediciones directas de corriente de fuga, perdidas por corona, interferencias electromagnéticas, y otros efectos asociados, utilizando equipos de alta sensibilidad sin necesidad de intervenir una línea en operación directamente, y minimizando el riesgo de algún accidente. Además, el diseño modular de las jaulas permite adaptar diferentes configuraciones experimentales, ya sea para comparar distintos materiales, formas de conductores o comportamientos bajo tensiones de distinta naturaleza.

A pesar de las ventajas mencionadas anteriormente, existen claras limitaciones inherentes a la escala del sistema. Al tratarse de una estructura reducida, las condiciones de borde y la proximidad de la jaula al conductor pueden influir en la distribución de campo eléctrico. Asimismo, el fenómeno observado puede diferir del comportamiento en líneas reales debido a la ausencia de efectos asociados a múltiples conductores, terrenos irregulares o condiciones meteorológicas variables. Es por ello que los resultados obtenidos deben ser interpretados como representaciones idealizadas del fenómeno, útiles para validar modelos teóricos, pero no necesariamente extrapolables de forma directa a sistemas a escala real. Otra limitación que se puede presentar, es el espacio físico en donde se ubicará el elemento una vez finalizada su construcción, debido a que generalmente suelen abarcar grandes distancias, dependiendo de las características constructivas que esta posea.

Las aplicaciones que poseen este tipo de elementos pueden ser variados. Son generalmente ocupados en estudios académicos, validación de modelos empíricos como los de Peek y Peterson, caracterización de nuevos materiales y geometrías de conductores, así como también en pruebas preliminares de diseño en sistemas de alta tensión.

2.7. Resumen y consideraciones

En este capítulo se ha buscado establecer una base teórica sólida sobre el fenómeno corona, abordando desde los procesos físicos que favorecen la descarga, hasta la caracterización de los distintos modelos de descarga según la polaridad y naturaleza de la tensión aplicada. Asimismo, se profundizó en las variables que influyen en la ocurrencia del fenómeno, y se revisaron diversos métodos que permiten calcular el gradiente eléctrico superficial en distintos tipos de conductores. Finalmente, se introdujo el concepto de jaula corona, destacando sus principales parámetros geométricos y el cálculo del gradiente superficial para la configuración correspondiente a este tipo de elemento experimental.

A continuación, se presenta el capítulo dedicado al diseño y modelación de la jaula corona, en el cual se detallan las decisiones técnicas adoptadas en cuanto a dimensiones, materiales, configuración eléctrica y simulación del comportamiento del campo eléctrico. Todo ello con el objetivo de construir el dispositivo en estudio para permitir la medición adecuada de la corriente de corona, lo que permitirá validar el correcto funcionamiento de la jaula desarrollada.

Capítulo 3

Diseño y construcción de la jaula corona

3.1. Determinación de parámetros

El primer desafío relacionado con el diseño de la jaula corona fue la elección de parámetros constructivos adecuados. Para ello, se comenzó revisando las jaulas corona que ya se encuentran construidas en el mundo y que han sido reportadas en la literatura utilizada como base para esta memoria. De este modo, se obtuvo una referencia clara de las dimensiones comúnmente empleadas, antes de recurrir al análisis teórico, el cual se encuentra desarrollado en el marco teórico de este documento. Un factor importante considerado en la definición de estos parámetros fue el espacio disponible en el laboratorio de Alta Tensión de la universidad, ya que este sería el lugar habitual de operación del sistema.

Como medio de información, para conocer las medidas y configuraciones usadas por las jaulas alrededor del mundo se plantea la siguiente tabla:

Artículo	Diámetro [m]	Largo sección medición [m]	Largo sección apantallamiento [m]	Forma de la jaula
[18]	1,5	1	0,5	Cilíndrica
[24]	1,5	1,5	1	Cilíndrica
[25]	-	3	0,5	Cuadrada
[4]	-	3	0,5	Cuadrada
[26]	-	1	0,25	Cuadrada
[8]	1,5	1,2	0,6	Cilíndrica
[27]	0,6	2,3	0,2	Cilíndrica
[10]	1,5	1	0,5	Cilíndrica
[28]	1	1,5	0,25	Cilíndrica

Tabla 3.1: Medidas de las diferentes jaulas corona reportadas en artículos (Elaboración propia).

Como se puede observar en la Tabla 3.1, algunas jaulas no presentan un diámetro definido, ya

que poseen una geometría cuadrada. Otro aspecto importante que se puede notar es que ninguna de las jaulas cilíndricas reportadas tiene un diámetro mayor a 2[m], debido al gran espacio físico que ocuparían. Fotografías de las jaulas mencionadas serán presentadas en la sección de anexos, con el fin de proporcionar un mejor apoyo visual.

Esta información sirve como base para la elección de un diámetro adecuado para la jaula a construir, además de proporcionar valores de referencia para los otros dos parámetros relevantes en su diseño: la longitud de la sección de medición y el largo de las secciones de apantallamiento.

Diámetro de la jaula

Como se mencionó anteriormente en el marco teórico, existe un radio mínimo que debe cumplir la jaula para evitar que los iones generados por el proceso de descarga impacten en sus paredes, lo cual alteraría la distribución del campo eléctrico y podría invalidar los resultados de los experimentos realizados.

Teniendo en cuenta la fórmula del radio mínimo, es posible aplicarla para obtener una cota de referencia a partir de la cual seleccionar el diámetro adecuado para la construcción de la jaula.

$$R_{min} = 2 \cdot (r_0 + d) \quad (3.1)$$

Por simple inspección de la fórmula, y como se mencionó en el marco teórico, una de las variables con mayor relevancia en la ecuación presentada anteriormente es la distancia iónica máxima. Esta debe ser determinada mediante modelos computacionales para obtener un valor preciso, especialmente en sistemas de mayor complejidad. Según [22], en su estudio sobre líneas de ultra alta tensión (1000 kV) y configuraciones complejas de conductores, como haces de ocho conductores, se encontraron valores de d que variaban entre 0,49 [m] y 0,72 [m], lo que justificaba el uso de jaulas con secciones de hasta 8 metros de lado. Cabe destacar que la jaula utilizada por los autores del artículo era de forma cuadrada. No obstante, en sistemas de laboratorio con menor escala geométrica y energética, las condiciones cambian sustancialmente.

Según [13] y [11], en configuraciones coaxiales el campo eléctrico decae rápidamente a medida que se incrementa la distancia al conductor, lo que limita significativamente la movilidad efectiva de los iones, ya que el gradiente superficial deja de aportar la misma cantidad de energía que en las zonas cercanas al conductor. Además, el contexto en el que se empleará la jaula corresponde a un sistema a baja escala. Esto implica que se busca replicar un fenómeno real —en este caso, el efecto corona—, pero a niveles reducidos. Un sistema de baja escala puede definirse como aquel que opera con tensiones moderadas ($\leq 100\text{--}200\text{kV}$), geometrías compactas (diámetros $\leq 1,5\text{m}$) y

configuraciones más simples, como el uso de un solo conductor en lugar de un haz.

De esta forma, extrapolando los resultados obtenidos por [22], y teniendo en cuenta el sistema en el que se estará trabajando, se pueden estimar valores conservadores de desplazamiento iónico d entre 5 y 10 [cm]. Así considerando un radio de conductor de 2,5 [cm] y un valor de d de 5[cm], se tiene que el radio mínimo es:

$$R_{min} = 2 \cdot (0,025 + 0,05) = 0,15[m] \quad (3.2)$$

Tomando en cuenta este valor, se decidió optar por construir una jaula que tuviera un diámetro de 1 [m], y por lo tanto un radio de 0,5 [m].

3.1.1. Largo de la sección de medición

Una vez definido el diámetro de la jaula a construir, también es necesario determinar la longitud de la sección central, conocida como sección de medición. Tomando nuevamente como referencia a [22], se indica que no existe un estándar o regla definida para seleccionar esta distancia. Por ello, con el fin de mantener proporciones adecuadas, se optó por una longitud de 100 [cm] (1 [m]) para dicha sección. Cabe destacar que la adición de unos anillos estructurales a ambos extremos, en los cuales se realizaron perforaciones para unir los segmentos de apantallamiento con la sección de medición y que mantienen la forma cilíndrica de la jaula, sumó 10 [cm] adicionales a cada lado. Por lo tanto, la longitud total de la sección de medición es de 120 [cm].

3.1.2. Largo de la sección de apantallamiento

Con respecto a la longitud de la sección de apantallamiento o de aterrizamiento —correspondiente a los cilindros más pequeños ubicados a cada lado de la sección de medición— se utilizó como referencia el trabajo de [22]. Según lo expuesto en el marco teórico, el largo de esta sección depende principalmente de la curvatura del conductor de prueba; es decir, a mayor curvatura, mayor debería ser la longitud de la sección de aterrizamiento. Al igual que en el caso de la sección de medición, no existe una regla general ni una cota fija que garantice su correcto funcionamiento. Por ello, la elección de este parámetro se basó tanto en las restricciones de espacio disponibles como en las medidas reportadas en la Tabla 3.1, donde puede observarse que esta sección suele ser proporcional a la longitud de medición, siendo en la mayoría de los casos aproximadamente la mitad de dicha medida. Para la jaula construida, se optó por un largo de 50[cm] entre ambos cilindros, es decir, 25[cm] por cada uno. Tal como ocurrió con la sección de medición, al añadirse los anillos estructurales que conectan esta sección con la de medición, la longitud total por cilindro aumentó hasta alcanzar los 45[cm].

La siguiente tabla muestra un resumen de las medidas escogidas para la construcción de la jaula corona:

Parámetro	Valor [cm]
Diámetro	100
Largo de la sección de medición	120
Largo de la sección de aterrizamiento	45

Tabla 3.2: Valores escogidos para los diferentes parámetros geométricos de la jaula corona (Elaboración propia).

3.2. Simulaciones realizadas

Una vez definidos los parámetros geométricos necesarios para la construcción de la jaula, se procedió a analizar el comportamiento del campo eléctrico en la estructura, considerando la configuración de cilindros concéntricos y las dimensiones seleccionadas como parámetros constructivos. Para ello, se utilizó el software de simulación por elementos finitos FEMM, en el cual se modeló un corte transversal de la sección de medición. En primer lugar, se definió el problema de acuerdo con los requerimientos que exige el programa. Así, se estableció un análisis de tipo planar, se seleccionó la escala en milímetros, y se especificó la longitud de la sección de medición como 120 [cm], conforme a lo determinado previamente. De esta manera, el resumen de la configuración del problema queda caracterizado en la figura 3.1:

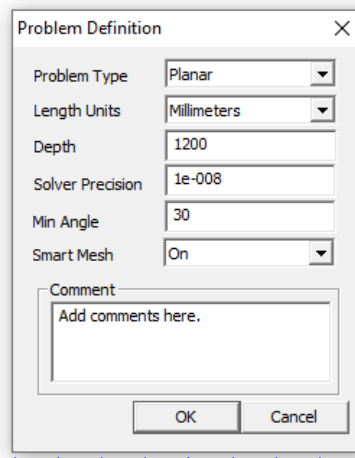


Figura 3.1: Definición del problema en el software (Elaboración propia).

De esta forma, se tomó un diámetro de 1 [m] para la jaula, y se seleccionó un conductor de 20,6 [mm] de diámetro a modo de prueba. Este es uno de los cables que se pretende probar experimentalmente y su elección responde únicamente al propósito de visualizar preliminarmente el

comportamiento del gradiente eléctrico superficial, tanto en las cercanías del conductor como en las paredes de la jaula.

Una vez establecido lo anterior, se procede a analizar los resultados obtenidos:



Figura 3.2: Vista de un corte transversal del sector de medición de la jaula corona (Elaboración propia).

Como se puede observar en la figura 3.2, el sistema simulado corresponde a tres círculos concéntricos. El círculo interior representa el conductor, para el cual se utilizó cobre como material en esta simulación. Los círculos exteriores corresponden a la representación de la jaula, considerando también su espesor. Cabe destacar que los materiales empleados fueron caracterizados utilizando las herramientas internas del software de simulación. Un aspecto importante a considerar son las condiciones de borde impuestas en el modelo. Al conductor se le aplicó una tensión de 100 [kV], mientras que a la jaula, al ser aterrizada, se le asignó un potencial de 0 [V].

Con estas condiciones definidas, se procedió a simular la distribución del campo eléctrico en el espacio comprendido entre el conductor y el borde de la jaula. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

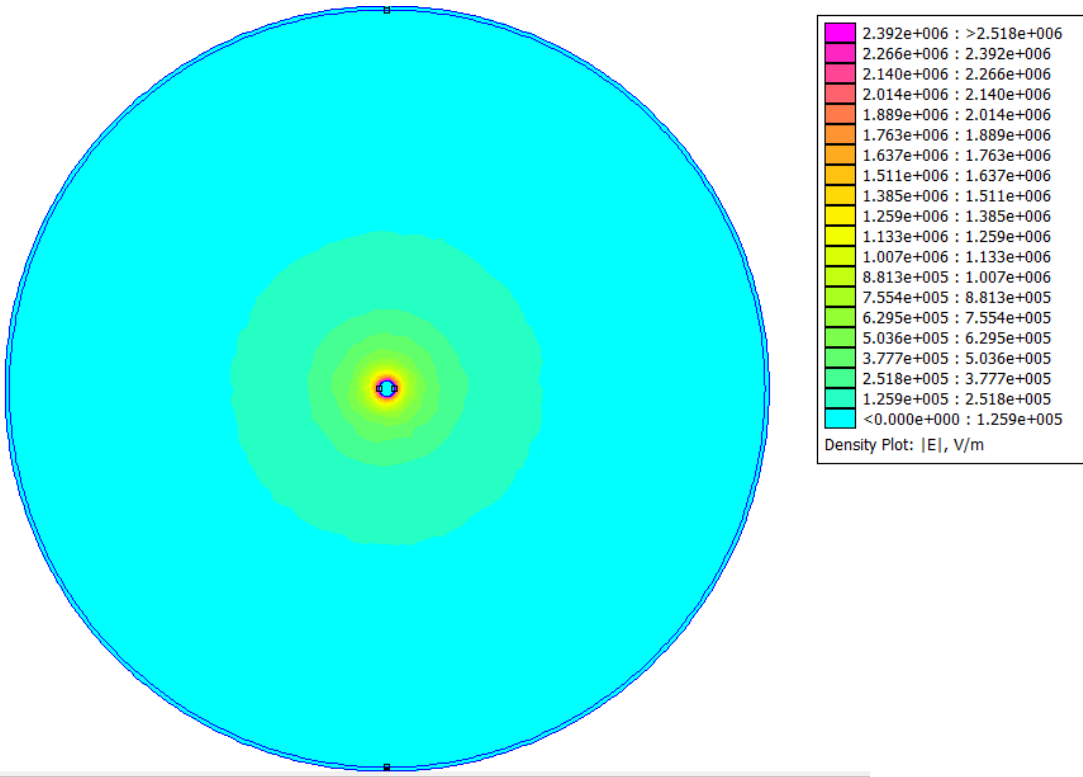


Figura 3.3: Densidad de Campo eléctrico en el espacio (Elaboración propia).

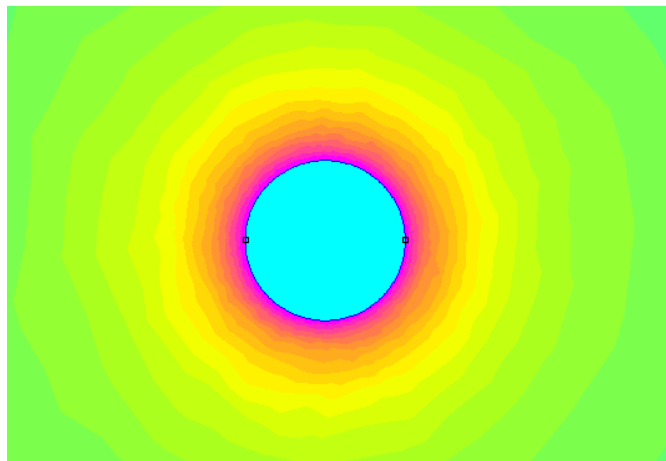


Figura 3.4: Zoom de la densidad de campo en las cercanías del conductor (Elaboración propia).

A partir de la figura 3.3 y 3.4 mostradas anteriormente, es posible observar cómo se distribuye el campo eléctrico en el espacio, así como la disminución progresiva de su intensidad a medida que uno se aleja del conductor. También se aprecia que el campo se encuentra fuertemente concentrado en las inmediaciones del conductor.

El mismo software de simulación permite obtener gráficos asociados a diversas variables electro quasi-estáticas, tales como la distribución de potencial eléctrico, la densidad de flujo eléctrico, y la intensidad del campo eléctrico, entre otras. Para este caso en particular, se graficará la magnitud del campo eléctrico, ya que esta información resulta útil para comprender el comportamiento esperado del campo en la jaula durante la ejecución de los experimentos. Usando las fórmulas vistas en la sección de marco teórico, se calculó la tensión de iniciación corona para el cable simulado y se obtuvo un valor de 120 [kV] aproximadamente.

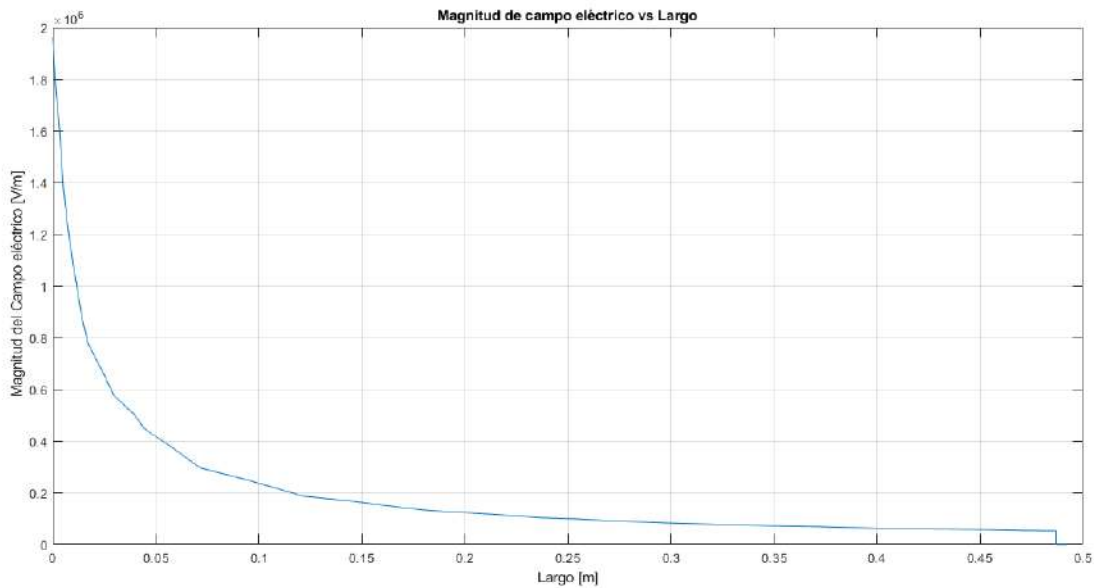


Figura 3.5: Campo eléctrico en función de la distancia de separación entre el conductor y la jaula corona (Elaboración propia).

3.3. Diseño de la jaula

Una vez definidos los valores de los parámetros geométricos de la jaula (diámetro, longitud de la sección de medición y longitud de la sección de apantallamiento), fue necesario realizar un modelo tridimensional de la estructura. Esto permitió visualizar de mejor manera todos los elementos que la compondrán, además de agregar detalles relevantes para su posterior construcción, considerando también aspectos prácticos como la modularidad y la facilidad de transporte.

Para este propósito se utilizó el software de diseño Autodesk Inventor Professional 2023, herramienta que resultó clave en el modelado de cada una de las partes que conforman la jaula. Una particularidad de este programa es que, una vez generado el modelo 3D, permite obtener automáticamente los planos constitutivos de cada sección, incluyendo sus dimensiones, materiales

y tolerancias especificadas. Asimismo, el software ofrece funcionalidades para verificar preliminarmente la integridad estructural de los modelos generados. De esta manera, se desarrollaron dos posibles diseños de jaula, los cuales se describirán en detalle a continuación, para finalmente justificar la selección del modelo que fue construido, explicando los criterios técnicos que motivaron dicha elección.

3.3.1. Primer Modelo

Para el primer modelo, se utilizaron las dimensiones previamente definidas y se procedió a modelar los tres cilindros que constituyen el cuerpo principal de la jaula.

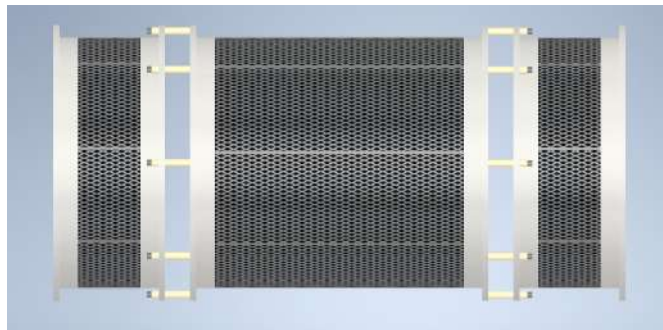


Figura 3.6: Vista lateral del primer modelo realizado (Elaboración propia).



Figura 3.7: Vista en diagonal del primer modelo realizado (Elaboración propia).

Como se observa en las figuras 3.6 y 3.7, las secciones de apantallamiento (cilindros exteriores) se encuentran unidas a la sección de medición (cilindro central) mediante bridas de acero, cada una con ocho perforaciones. Estas perforaciones están destinadas a albergar pasadores de material aislante, los cuales cumplen la doble función de proporcionar la unión mecánica entre las secciones y garantizar su aislamiento eléctrico. Adicionalmente, se propone que las superficies exteriores de las secciones estén recubiertas con malla de acero desplegado en lugar de lámina sólida, con el

objetivo de reducir el peso total de la estructura sin comprometer su efectividad como pantalla electrostática.

3.3.2. Segundo Modelo

El segundo modelo desarrollado mantiene la misma lógica estructural: dos cilindros externos (secciones de apantallamiento) unidos a los extremos de un cilindro central (sección de medición). En este caso, sin embargo, se priorizó la reducción de masa del conjunto, seleccionando materiales más livianos pero que conserven una resistencia estructural adecuada.

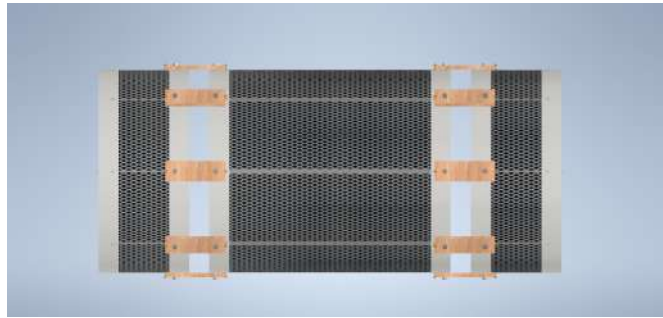


Figura 3.8: Vista lateral del segundo modelo realizado (Elaboración propia).

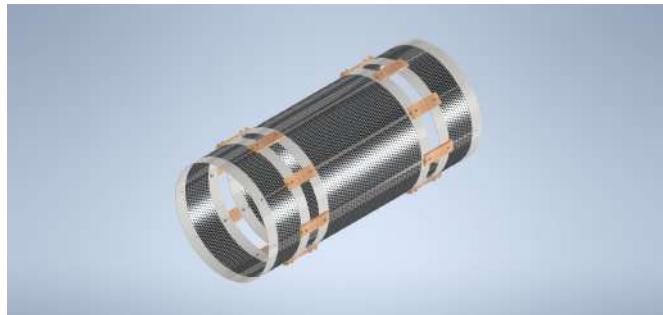


Figura 3.9: Vista en diagonal del segundo modelo realizado (Elaboración propia).

Tal como se aprecia en las figuras 3.8 y 3.9, el método de unión entre las secciones en este segundo modelo difiere del anterior, ya que prescinde del uso de bridas metálicas. En su lugar, se propone emplear un material aislante que, mediante perforaciones coincidentes en la jaula y en el aislante, permita realizar la unión mecánica, asegurando al mismo tiempo el aislamiento eléctrico entre los cilindros.

3.4. Decisión del modelo a construir

Con ambos modelos 3D ya definidos, el siguiente paso fue elegir el diseño más adecuado para su construcción. Si bien ambos comparten una base conceptual similar —cilindros conectados mecánicamente pero aislados eléctricamente—, presentan diferencias significativas en los materiales utilizados y en los métodos de ensamblaje. Estas diferencias inciden directamente en los costos de fabricación, por lo que el análisis económico también fue considerado como criterio de decisión. A modo de comparación entre los modelos, se presenta la siguiente tabla.

	Primer modelo	Segundo modelo
¿Es modular?	Si	Si
Peso	606,281 [kg]	111,515 [kg]
Valor cotizado	179,20 [UF]	53,36 [UF]

Tabla 3.3: Tabla comparativa para la decisión del modelo escogido (Elaboración propia).

A partir del análisis comparativo, se concluye que el segundo modelo cumple de mejor forma con los requerimientos técnicos y logísticos del proyecto. Por esta razón, se procedió a generar los planos constructivos desde el software Autodesk Inventor y se iniciaron las gestiones de cotización en talleres especializados para su fabricación

De esta manera el resultado se muestra en la imagen 3.10 que corresponde a la jaula corona ya construida y en dependencias de la universidad.



Figura 3.10: Jaula Corona recién construida (Elaboración propia).

Capítulo 4

Modelo Experimental

Antes de presentar el montaje experimental real, resulta útil representar el sistema mediante un modelo circuital básico que permita visualizar, de manera simplificada, el comportamiento eléctrico del conjunto. Este modelo, aunque sencillo, actúa como un puente entre el análisis teórico del efecto corona y su implementación práctica. En él se consideran los elementos principales del sistema: la fuente de alta tensión alterna, el conductor central, la jaula corona conectada a tierra y el trayecto de la corriente de fuga generada por el efecto corona, la cual fluye a través de una resistencia shunt. La figura 4.1 resume lo explicado anteriormente.

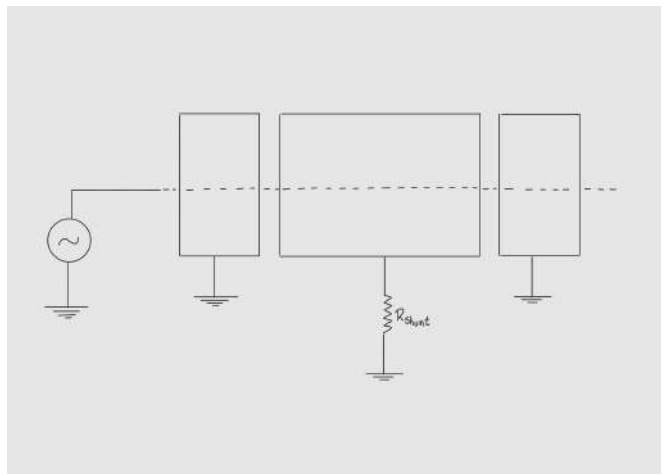


Figura 4.1: Esquema circuital básico del modelo experimental (Elaboración propia).

De esta forma, teniendo ya una idea clara del setup experimental, se procedió a ensamblar el sistema de medición basado en un conductor cilíndrico ubicado dentro de la jaula corona, el cual es alimentado mediante una fuente de tensión alterna. En esta sección se presenta el modelo experimental desarrollado, detallando los elementos utilizados para la generación, control y medición del sistema. Para facilitar la comprensión del montaje, la figura 4.2 presenta una fotografía que

muestra una vista general del sistema ensamblado, en la cual se han enumerado todas sus partes constitutivas.



Figura 4.2: Modelo experimental utilizado para la realización de mediciones (Elaboración propia).

4.0.1. Elementos del modelo experimental

A partir de la figura 4.2, se tienen los siguientes elementos que conforman el sistema:

Elemento número 1: Aisladores de soporte

Es posible observar, a cada lado de la jaula, un aislador de suspensión polimérico de 8 faldas, el cual se utilizó como soporte para tensar el conductor. La figura 4.3, presenta el aislador usado en las pruebas experimentales.



Figura 4.3: Aislador de suspensión polimérico de 8 polleras.

Además se presenta la siguiente tabla resumen con características técnicas del aislador en cuestión.

Descripción	Características Físicas						Propiedades eléctricas			
	Clase	N° Faldas	Peso [kg]	Diámetro Faldas [mm]	Distancia [mm]			[kV]		
Entre ejes					Fuga	Arco seco	Tensión de contorno en seco	Tensión de contorno en húmedo	Tensión critica impulso positivo	Tensión critica impulso negativo
28 kV	8	1,15	79 ($\pm 0,5$)	475 (± 5)	713	337	140	120	270	270

Tabla 4.1: Datasheet de aislador de suspensión polimérico de 8 polleras [29]

A partir de la tabla 4.1, es posible observar diversos datos técnicos correspondientes al aislador que se utilizará. Un aspecto relevante de esta información es la tensión de ruptura del aislador, ya que representa un límite para el nivel de tensión que podrá aplicarse en los ensayos posteriores.

Elemento número 2: Tensor

Como segundo elemento presente en el montaje experimental, se puede observar el tensor, ubicado inmediatamente después de uno de los dos aisladores. Su función principal es tensar el conductor una vez sujetado, con el fin de evitar el pandeo. Una imagen del tensor utilizado se mostrará en la sección de anexos.

Elemento número 3: Anillos Corona

Este elemento es uno de los más importantes dentro de la configuración de los ensayos realizados. Se trata de dispositivos metálicos con forma toroidal que se colocan en puntos de alta tensión, como los extremos de los aisladores, barras de conexión o componentes de líneas de transmisión y

subestaciones. Su función principal es distribuir de manera uniforme el campo eléctrico, reduciendo los puntos de alta concentración que podrían generar descargas parciales o provocar el inicio del efecto corona en regiones no deseadas del sistema [13, 11]. Por lo tanto, para el modelo experimental desarrollado, fue necesario instalar estos anillos en ambos extremos del conductor, con el objetivo de suavizar la distribución del campo eléctrico, extendiéndolo sobre una zona más amplia y reduciendo así el gradiente eléctrico superficial máximo en estos sectores. La figura 4.4 presenta una imagen referencial de los anillos corona utilizados durante los ensayos.



Figura 4.4: Anillo corona ocupado durante los ensayos.

También puede observarse en la fotografía el sistema diseñado para sujetar el conductor en ambos extremos. Este consiste en la utilización de un tubo galvanizado de 4[cm] de diámetro, soldado a los cuatro extremos del anillo. De esta forma, por un lado, el conductor se fija mediante un perno, y por el otro se encaja el tensor o el aislador, dependiendo del extremo observado.

Con los tres elementos de soporte ya explicados, la figura 4.5 corresponde a la disposición espacial de estos elementos.



Figura 4.5: Disposición espacial del conjunto aislador-tensor-anillo

Elemento número 4: Conductores utilizados

Para las pruebas realizadas se utilizaron dos tipos de conductores: uno de cobre trenzado de 37 hebras o hilos, con un diámetro de 20,67 [mm], y otro de aluminio de 19 hebras, con un diámetro de 19,51 [mm].

Para el conductor de aluminio se tienen la siguientes características:

Código	Diámetro del cable 6201	Sección	Cable ACSR, mismo diámetro		N° de hilos por diámetro	Diámetro total	Peso total	Resistencia nominal	Resistencia máx a 20°C
	MCM		mm ²	AWG o MCM					
Cairo	465,4	235,8	397,5	26/7	19x3,98	19,88	645,7	7,098	0,142

Tabla 4.2: Características del conductor de aluminio utilizado [30].

A su vez, las características del conductor de cobre utilizado se presentan a continuación:

Codigo	Calibre	Sección nominal	Clase de cableado	Cantidad de alambres	Diametro nominal alambre	Diametro exterior nominal	Peso aproximado	Diametro nominal conductor	Resistencia max a 20°C	Capacidad de corriente
	kcmil									
Cobre	500	253	A y B	37	2,95	20,6	2270	20,6	0,074	773

Tabla 4.3: Características del conductor de cobre utilizado durante las pruebas [31].

Elemento número 5: Jaula Corona

El elemento número 5, tal como se indica en la figura 4.2, corresponde a la jaula corona, la cual está compuesta por tres secciones: dos ubicadas en los extremos, denominadas secciones

de apantallamiento, y una sección central, llamada sección de medición. Más detalles sobre su construcción y función fueron explicados en las secciones anteriores.

Elemento número 6: Bases de madera

Estos elementos, como su nombre lo indica, son los encargados de soportar la jaula y mantenerla elevada del suelo. Se colocan debajo de los cilindros pequeños, correspondiente a las secciones de apantallamiento. Fueron fabricados en madera terciada y presentan las siguientes dimensiones:

Medida	Valor [cm]
Largo	80
Ancho	45
Alto	27

Tabla 4.4: Medidas de las bases de madera (Elaboración propia).

La figura 4.6 muestra una imagen referencial de una de las bases de madera construida.



Figura 4.6: Bases de madera para sostener a la jaula corona.

Elemento número 7: Anillos corona

Siguiendo con los elementos presentes en el montaje, se presentan los anillos corona fabricados a partir de tubo de aluminio corrugado rígido. Estos se implementaron en todas las zonas que presentaban puntas o geometrías no uniformes, con el objetivo de suavizar la distribución del campo eléctrico, retardar la aparición del efecto corona en dichas áreas y concentrar su manifestación únicamente en el conductor central. La figura 4.7 muestra uno de estos anillos construidos.



Figura 4.7: Anillo de corona utilizado en puntas de pernos.

Elemento número 8: Uniones mecánicas/aislantes de las secciones

Estas uniones fueron fabricadas con un material aislante llamado *Technyl*, el cual es una poliamida (PA) del tipo 6.6. Esta clase de poliamida forma parte de los termoplásticos y se caracteriza principalmente por sus excelentes propiedades, especialmente en cuanto a resistencia mecánica, a los choques y a las vibraciones. Además, presenta una alta resistencia al desgaste, a la abrasión, a las altas temperaturas y a productos químicos [32].

Cabe destacar que la razón del uso de este material radica en que los cilindros deben estar unidos mecánicamente, pero aislados eléctricamente. La distancia entre el cilindro de apantallamiento y el cilindro de medición es de 10 [cm]. La figura 4.8 muestra la unión de los segmentos pertenecientes a la jaula. Al momento de recibir la jaula, esta traía pernos de acero, lo que afectaba directamente al inicio del fenómeno corona, disminuyendo su gradiente de iniciación crítico. Esto fue resuelto reemplazando los pernos de acero por pernos de material aislante (PVC).



Figura 4.8: Unión hecha de el material aislante TECHNYL.

Capítulo 5

Resultados y análisis

5.1. Preámbulo

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las mediciones de corriente de fuga realizadas mediante la jaula corona construida. El objetivo principal fue verificar el funcionamiento del equipo diseñado, para lo cual se registraron las formas de onda de la corriente mediante un osciloscopio.

Teniendo en cuenta que los osciloscopios solo pueden medir valores de tensión, se hace necesario el uso de una resistencia shunt para obtener la corriente de fuga mediante la Ley de Ohm. Con esto en mente, se construyeron dos resistencias shunt de diferentes valores para este propósito. Estas resistencias fueron fabricadas a partir de arreglos en paralelo utilizando resistencias electrónicas. Los valores de las shunt utilizadas fueron:

- $R_{sh1} = 4239 \text{ } [\Omega]$
- $R_{sh2} = 100000 \text{ } [\Omega]$

Los valores de las resistencias construidas tienen su origen a partir de la corriente pre-corona. Esta corriente fue calculada considerando a la jaula como un condensador de cilindros concéntricos. Según [33], la capacitancia por unidad de longitud para una configuración de este estilo viene dada por la siguiente ecuación:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} [F/m] \quad (5.1)$$

Considerando que el largo del sector de medición de la jaula es de 1,2 [m], y usando el conductor de cobre que posee un diámetro de 20,6 [mm], la capacitancia del sistema viene dada:

$$C = 42,24 \text{ [pF]}$$

Con esto calculado, la corriente asciende a $4,23 \text{ [\mu A]}$ aproximadamente. Es debido al valor de corriente presentado anteriormente que se decidió por los valores de resistencia, ya que si consideramos el valor de la resistencia de $100 \text{ [k}\Omega\text{]}$, da una tensión de 423 [mV] , lo cual es un valor suficientemente alto para poder ser medido de manera precisa por los instrumentos de medición usados. El mismo análisis puede ser ocupado para la fabricación de la resistencia de $4,239 \text{ [k}\Omega\text{]}$.

Para efectos prácticos, los gráficos que se presentarán corresponden a los obtenidos usando la resistencia de $100 \text{ [k}\Omega\text{]}$, ya que dividir por una potencia de 10 resulta más sencillo para interpretar los valores. No obstante, los gráficos obtenidos utilizando la resistencia de $4,239 \text{ [k}\Omega\text{]}$ serán incluidos en la sección de anexos.

La figura 5.1 muestra una imagen de las resistencias shunt ocupadas para las mediciones.



Figura 5.1: Resistencias shunt utilizadas durante las pruebas

Además las pruebas fueron realizadas fuera del laboratorio de alta tensión de la universidad, por lo que informar las condiciones ambientales medidas al comienzo y al final de cada ensayo gana relevancia para una posterior comparación usando la jaula en otro ambiente.

5.2. Gráficas de corriente de fuga para aluminio

Como punto de partida, se iniciaron las mediciones utilizando el conductor de aluminio caracterizado en el capítulo cinco de esta memoria. Antes de comenzar a elevar la tensión, se midieron las condiciones ambientales, ya que factores como la temperatura, la presión atmosférica y la humedad relativa influyen directamente en el comportamiento del efecto corona. Estas variables afectan la densidad del aire y, por lo tanto, el valor del gradiente eléctrico crítico necesario para la formación de la descarga. Registrar las condiciones ambientales permite corregir o interpretar adecuadamente los resultados obtenidos, asegurando que las mediciones sean comparables y representativas de las condiciones reales en las que operan las líneas aéreas. A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores de las condiciones ambientales al inicio y al término de los ensayos:

Variable	Inicio	Final	Promedio
Temperatura (°C)	17,3	17,1	17,2
Humedad relativa (%)	73,9	75,7	74,8
Presión (mm Hg)	762	762	762

Tabla 5.1: Condiciones ambientales del ensayo con el conductor de aluminio (Elaboración propia).

Con las condiciones ambientales ya informadas, se presenta la figura 5.2 que corresponde a la corriente de fuga para el conductor de aluminio usando la R_{sh2} .

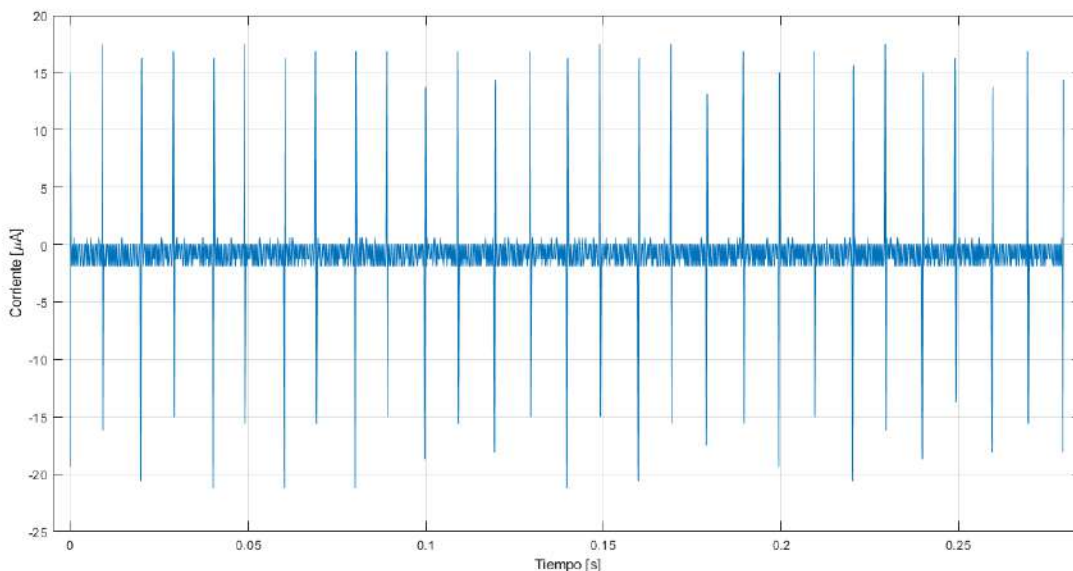


Figura 5.2: Corriente de fuga en función del tiempo en conductor de aluminio a 100 [kV] con $R_{sh}=100$ [kΩ] (Elaboración propia).

La figura 5.3, muestra un acercamiento de un pulso de corriente para el conductor de aluminio utilizado durante las pruebas.

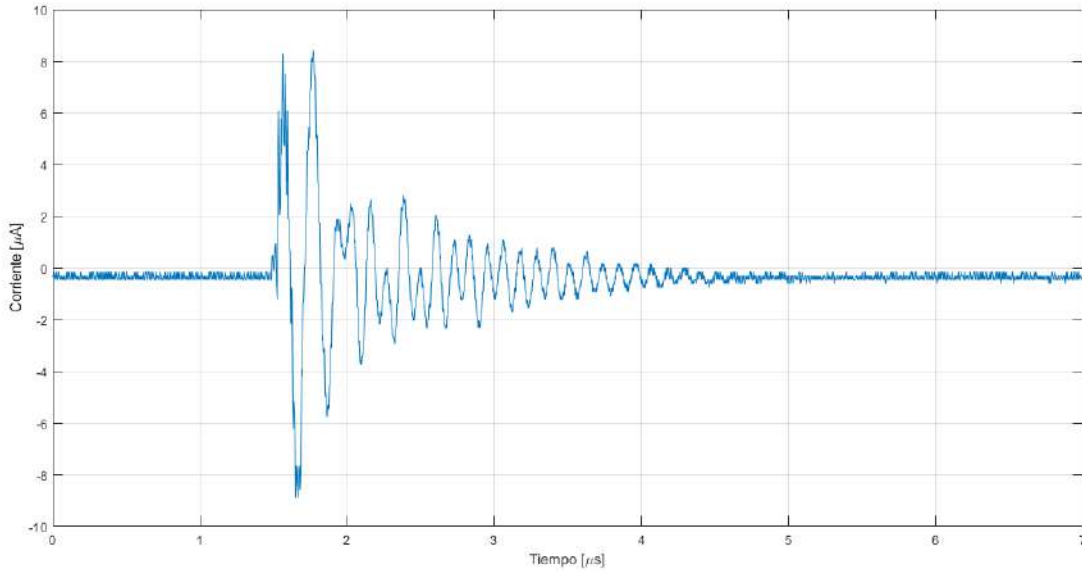


Figura 5.3: Acercamiento de pulso de corriente en conductor de aluminio para 100 [kV] con $R_{sh} = 100$ [k Ω] (Elaboración propia).

5.3. Gráficas de corriente de fuga para cobre

Con respecto al conductor de cobre, se procedió de la misma forma que con el de aluminio. A continuación, se muestra una tabla con las condiciones ambientales medidas al inicio y al final de los ensayos realizados.

Variable	Inicio	Final	Promedio
Temperatura (°C)	16,7	16,8	16,75
Humedad relativa (%)	76,4	75,2	75,8
Presión (mmHg)	762	762	762

Tabla 5.2: Condiciones ambientales del ensayo con el conductor de cobre (Elaboración propia).

De la misma manera que el inciso anterior, la figura 5.4 muestra la corriente de fuga encontrada para el conductor de cobre a una tensión de 100 [kV].

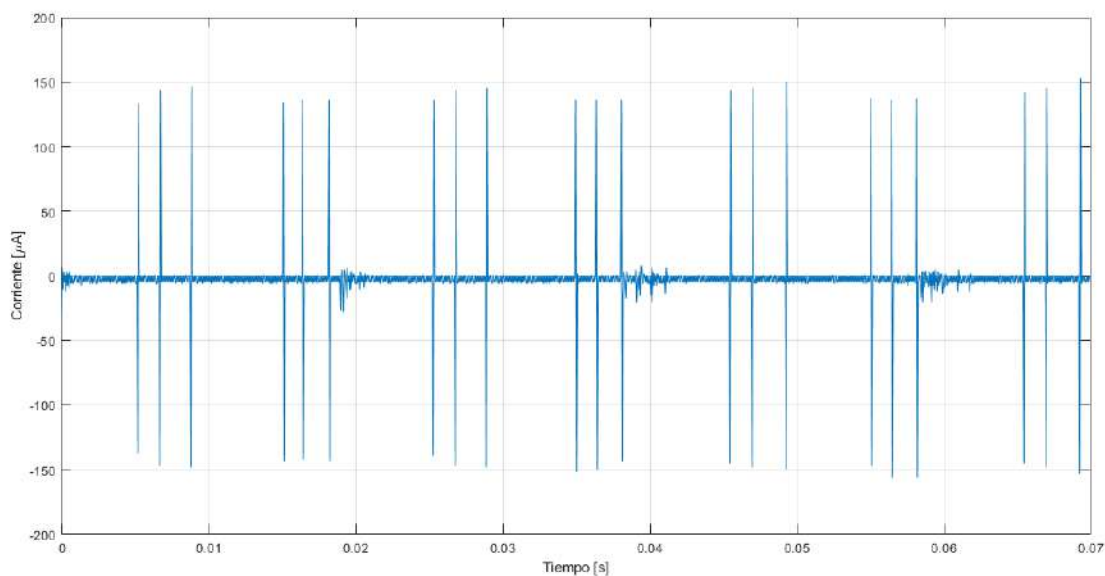


Figura 5.4: Corriente de fuga en función del tiempo en conductor de cobre a 100 [kV] con $R_{sh}=100$ [k Ω] (Elaboración propia).

A modo de símil con el aluminio, la figura 5.5, muestra el acercamiento de uno de los pulsos de corriente para el conductor de cobre.

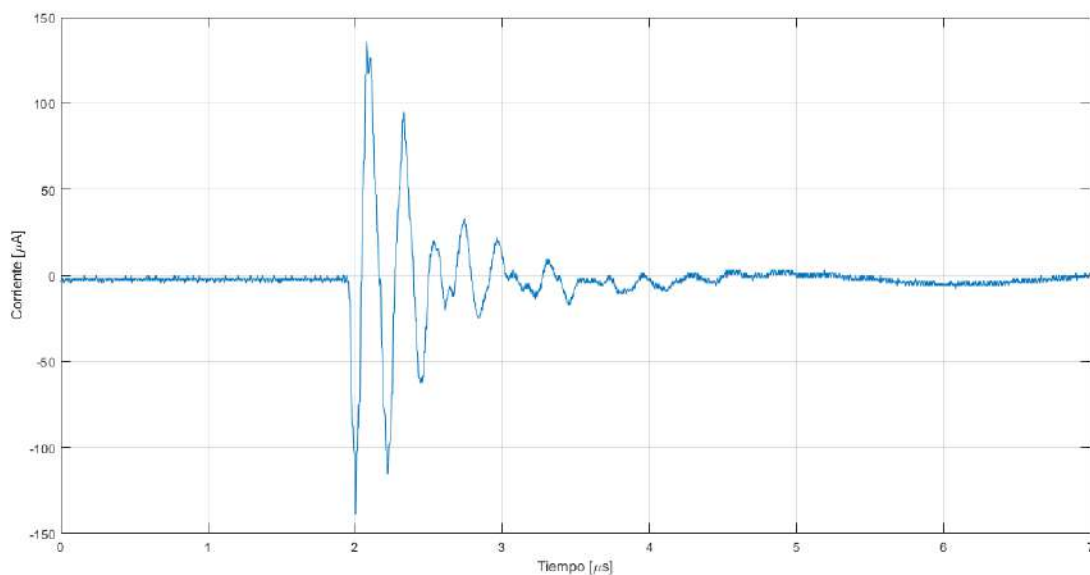


Figura 5.5: Acercamiento de pulso de corriente en conductor de cobre para 100 [kV] con $R_{sh}=100$ [k Ω] (Elaboración propia).

5.4. Análisis de los resultados

El análisis de los gráficos obtenidos y mostrados anteriormente evidencia que la jaula diseñada cumple con el objetivo principal de esta memoria, el cual consistía en medir fenómenos relacionados con el efecto corona, específicamente la detección y medición de corrientes de fuga. La presencia de señales de corriente en las distintas mediciones constituye una validación directa del funcionamiento de la jaula, ya que, en ausencia del efecto corona o de un sistema de captación adecuado, no se habrían registrado señales de este tipo.

Se observa que las formas de onda presentan características esperadas de un fenómeno de descarga eléctrica corona, tales como irregularidades en la amplitud y patrones de fluctuación, además presenta una congruencia con los modos corona reportados en la sección de marco teórico, asimilándose por ejemplo, a la forma que tiene un pulso Trichel como a los pulsos Streamer, esto radica que en tensión alterna, como la usada para energizar el sistema, se presentan ambos tipos de modos de descarga. Un ejemplo de esto puede apreciarse en la figura 5.2 para el aluminio y en la figura 5.4 para el cobre. Esta observación puede corroborarse con la literatura técnica, en la que se describe que el efecto corona genera corrientes pulsantes de baja magnitud, detectables mediante equipos de medición sensibles [11]. En particular, Ref. [34] describe en su análisis que las corrientes asociadas a la ionización del aire, o corrientes de fuga, consisten en trenes de pulsos de corta duración. Esto puede observarse en las figuras 5.3 y 5.5, donde se presenta un acercamiento a estos pulsos.

La naturaleza transitoria de los pulsos de corona se explica por el proceso de generación de las descargas: cada evento de ionización libera un número limitado de cargas —iones y electrones, según lo descrito en el marco teórico de esta memoria— que se recombinan o migran rápidamente hacia los electrodos, provocando una rápida disipación de energía. En consecuencia, cada descarga corona es de corta duración, como se ha evidenciado en los ensayos experimentales. Asimismo, se aprecia que los pulsos observados son similares a uno de los modos de descarga descritos en la sección correspondiente del marco teórico, más específicamente a los denominados pulsos Trichel.

Otro punto de interés para el análisis de los resultados radica en la condiciones ambientales presentes el día de las mediciones y como estas afectaron en la aparición del fenómeno corona. Como es posible observar a partir de las tablas 5.1 y 5.2 que muestran estas condiciones, la humedad en particular ese día estaba muy alta, teniendo un 75 % en promedio entre las mediciones realizadas para los dos tipos de conductores respectivamente. Según [33], el factor humedad incide principalmente en el fenómeno corona, más específicamente en la rigidez dieléctrica del aire. En

condiciones como las registradas, el aire contiene una mayor cantidad de moléculas de vapor de agua, lo que facilita la ionización del medio, y por ende, reduce el campo de iniciación crítico para iniciar la descarga corona. A manera de comparación entre lo obtenido y lo presentado en la teoría, por ejemplo en las ecuaciones de Peek, estas están basadas en aire seco o con baja humedad. Para análisis prácticos o comparaciones como lo realizado experimentalmente, se puede considerar una humedad relativa estándar de 20 a 30 % [19]. En resumen, los factores medioambientales, como la temperatura, la presión o la humedad, representan un peso importante en los valores de iniciación corona. Para este trabajo en particular la humedad del día de las mediciones incidió en tener fenómeno corona antes de lo estimado.

Siguiendo con el análisis, corresponde hablar sobre la tensión de inicio de corona para ambos conductores. Utilizando la fórmula presentada en el capítulo de marco teórico, se calculó la tensión de iniciación de corona. Para el conductor de cobre, considerando las condiciones medioambientales medidas, se obtuvo un valor teórico de 109,5 kV, mientras que para el aluminio, siguiendo el mismo procedimiento, se calculó una tensión de inicio de corona teórica de 105,9 kV. Sin embargo, al momento de realizar los ensayos, se pudo observar que el efecto corona comenzaba mucho antes de los valores calculados: alrededor de los 60 kV para ambos conductores ya se registraban pulsos de corona en la pantalla del osciloscopio. Esta diferencia entre lo medido y lo calculado podría deberse como se explicó anteriormente al factor humedad presente en el ambiente, puesto que esto cambia las fórmulas usadas para calcular la tensión de inicio de corona, agregando este parámetro. Otra posible explicación para la diferencia entre lo medido y lo calculado radica en que en el sistema usado para los experimentos podrían haber otras fuentes de corona, como por ejemplo pequeñas puntas, elementos que no tienen bordes redondeados, por lo que se podría estar iniciando el efecto mucho antes en estos focos.

Volviendo a las figuras presentadas anteriormente (5.2 y 5.4), es posible observar una diferencia en la magnitud de los pulsos encontrados. En particular podemos notar que las magnitudes de corriente encontrada para el conductor de aluminio son de las decenas de micro amperios, mientras que las magnitudes de corriente del conductor de cobre están en torno a las centenas de micro amperios. Considerando que el cobre posee un diámetro un poco mayor que el aluminio, la teoría nos dice que el campo eléctrico en su superficie debería ser menor. El cálculo del gradiente crítico para el cobre da un valor de 29,74 [kV/cm], mientras que para el aluminio da un valor de 29,87 [kV/cm], esto quiere decir que el campo eléctrico de iniciación del aluminio es un 0,44 % mayor que el del cobre, por lo que se necesitaría mayor tensión para el inicio del efecto corona. Sin embargo, es importante distinguir entre el umbral de inicio de corona, el cual viene determinado por la intensidad del campo necesario para ionizar el aire y la corriente medida una vez que la descarga

está en marcha. En otras palabras, aunque el cobre podría requerir una mayor tensión para iniciar el fenómeno, una vez que el efecto corona ha comenzado, el comportamiento del material y su superficie pueden influir fuertemente en la intensidad de la corriente generada. De esta forma una de las razones de esta diferencia puede estar relacionada con el estado superficial del conductor. El cobre, dependiendo del tratamiento superficial, puede presentar mayor rugosidad o microdefectos que actúan como sitios de intensificación del campo eléctrico, promoviendo la ionización local del aire. Por ejemplo, si el conductor de cobre es trenzado, como el usado en las pruebas experimentales, las uniones entre alambres de cobre pueden generar huecos o bordes más pronunciados debido a la menor ductibilidad del material [35]. Por otro lado, el aluminio, presenta una capa natural de óxido (Al_2O_3) o *Alumina* que puede actuar como barrera dieléctrica. Esta capa de óxido es extremadamente dieléctrica ($\rho \sim 10^{14}$ [Ω cm]) y de alta rigidez dieléctrica, alcanzando el orden de los 30 [MV/m], lo que puede suprimir la emisión directa de electrones desde el metal hacia el aire [36]. Para que comience la ionización, el campo eléctrico debe ser suficientemente alto no solo para ionizar moléculas de aire, sino también para superar o perforar la barrera dieléctrica de la alúmina en los micropuntos críticos. Esto eleva la tensión de inicio de corona efectiva y puede limitar la corriente de emisión sostenida. A modo de resumen se puede notar que la diferencia en las magnitudes de la corriente medida se podría deber a que el aluminio que fue probado experimentalmente estaba mejor protegido eléctricamente debido a su óxido superficial, mientras que la superficie del cobre permitía un intercambio de carga más libre con el aire.

Finalizado el análisis de los resultados, y aunque en este trabajo se obtuvo únicamente un valor cuantitativo correspondiente a la tensión de iniciación del efecto corona, no se profundizó en un análisis detallado ni en la caracterización de las señales registradas, como podría haberse realizado mediante el cálculo de valores efectivos (RMS), análisis espectral o estimaciones de energía. No obstante, el hecho de haber logrado registrar y visualizar de forma clara las señales de corriente asociadas al fenómeno resulta suficiente para cumplir con el objetivo principal de validar experimentalmente el funcionamiento de la jaula corona diseñada.

Capítulo 6

Conclusiones

El presente trabajo tuvo como objetivo principal el diseño y la construcción de una jaula corona de tipo cilíndrica, con el fin de permitir la medición de fenómenos asociados al efecto corona, tales como corrientes de fuga, ruido audible y pérdidas por corona. A partir del análisis de los resultados obtenidos, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Se logró exitosamente el diseño y la construcción de una jaula corona funcional, capaz de registrar fenómenos vinculados al efecto corona. La validación experimental se realizó mediante la obtención de formas de onda de corriente asociadas al fenómeno, lo que demuestra el cumplimiento de los objetivos planteados en esta memoria. Se pudo comprobar que los valores de iniciación de corona teóricos, calculados mediante la expresión empírica propuesta por Peek, diferían de los valores medidos experimentalmente. Esta discrepancia se atribuye, en parte, a las condiciones ambientales presentes el día de la realización de los ensayos. Uno de los parámetros que tuvo un rol decisivo en esta diferencia fue la humedad relativa del aire, que alcanzó un promedio del 75 % durante las mediciones. Este nivel de humedad favorece la ionización del aire al reducir la rigidez dieléctrica del medio, provocando que el efecto corona se manifieste a tensiones menores que las previstas por los modelos ideales. Cabe recordar que las expresiones de Peek están formuladas bajo supuestos de condiciones estándar y superficies perfectamente lisas, lo cual no se replica completamente en un entorno experimental. Por tanto, estos resultados refuerzan la necesidad de considerar las condiciones reales del ambiente y las características físicas de los conductores cuando se evalúa el inicio del efecto corona en aplicaciones prácticas.
- Durante las pruebas, se observaron corrientes de fuga coherentes con lo reportado en la literatura técnica. Por ejemplo en [18], la corriente de fuga presente está en los niveles de las centenas de los μA , dependiendo del diámetro del conductor escogido. En [24], las corrientes de fuga medidas ascienden en el rango de las decenas de μA . Por otro lado en [4], se informaron

corrientes que iban entre las decenas y las centenas de μA . Cabe destacar que los artículos presentados son ensayos realizados con tensiones en DC. Como es posible observar a partir de los gráficos obtenidos de las mediciones realizadas, los ordenes de magnitud de la corriente de fuga registrada fueron similares a lo mencionado en la literatura, lo cual corresponde a pulsos transitorios de baja magnitud, lo que respalda la capacidad de la jaula como instrumento de detección del fenómeno de descarga corona.

- A pesar de las mediciones realizadas, el modelo experimental de la jaula (incluyendo su estructura, sistema de soporte de cables y anillos corona) presenta ciertas limitaciones técnicas. Por ejemplo, la tensión máxima aplicable al conductor está limitada a 120 [kV], debido a la tensión de soportabilidad de los aisladores utilizados como soportes, según especificaciones del fabricante. Por seguridad operativa, durante los ensayos se empleó un valor máximo de 110 [kV]. Asimismo, el sistema de anclaje actual de los conductores restringe el uso a diámetros menores o iguales a 4 [cm]; probar con conductores de mayor diámetro requeriría la fabricación de nuevos anillos corona. No obstante, considerando estas limitaciones, se concluye que la jaula es plenamente funcional y apta para estudios experimentales sobre el efecto corona.
- Con respecto a las diferencias observadas en los niveles de corriente de fuga medidos para ambos conductores, las mediciones realizadas a 100 [kV] permitieron identificar diferencias significativas en el comportamiento entre el conductor de cobre y el de aluminio. A pesar de que el conductor de cobre presentaba un diámetro ligeramente mayor que el de aluminio, las magnitudes de corriente medidas fueron considerablemente más altas. Este resultado puede atribuirse a factores como el estado superficial del material, ya que el cobre podría presentar mayor rugosidad o microdefectos que intensifican localmente el campo eléctrico, facilitando el inicio de descargas parciales. Por el contrario, la capa natural de óxido que se forma en el aluminio puede actuar como una barrera pasiva, reduciendo la aparición de estos puntos críticos.
- Las simulaciones realizadas mediante el método de elementos finitos permitieron analizar la distribución del campo eléctrico en el espacio comprendido entre el conductor y la jaula. Los resultados muestran un comportamiento coherente con la teoría: el campo eléctrico y el potencial decrecen progresivamente a medida que se incrementa la distancia respecto del conductor, lo que valida la configuración geométrica adoptada.

6.1. Trabajos futuros

- En futuros trabajos, se propone mejorar el diseño experimental de la jaula corona con el objetivo de asegurar que el único origen del efecto corona sea el conductor dispuesto en su interior. Esto implicaría perfeccionar la distribución geométrica, el acabado superficial y los elementos de soporte, de modo de eliminar posibles puntos de intensificación del campo eléctrico en componentes secundarios como la jaula metálica, los aisladores o las conexiones. De este modo, se podría garantizar una medición más precisa, representativa y controlada del fenómeno, focalizada exclusivamente en las descargas originadas por el conductor bajo ensayo.
- En futuras investigaciones, se propone realizar un análisis cuantitativo detallado de las formas de onda de las corrientes de fuga generadas por el efecto corona, con el objetivo de obtener una caracterización más precisa del fenómeno. Este análisis incluiría el cálculo del valor RMS de las corrientes de fuga, lo cual permitiría determinar la magnitud promedio de la corriente y su impacto en términos de energía disipada. Además, se propone realizar un análisis espectral para identificar las frecuencias dominantes de las descargas de corona, lo cual es crucial para comprender las pérdidas de energía y el ruido audible generado. Para ello, se podrían emplear la transformada de Fourier y filtros digitales avanzados que permitan separar las señales de corona del ruido ambiental, mejorando así la calidad de las mediciones. Este estudio proporcionaría una mejor comprensión del comportamiento dinámico de la corriente de fuga y abriría la puerta a futuros trabajos enfocados en la minimización de las pérdidas por corona y en el desarrollo de tecnologías para la atenuación del ruido asociado en sistemas de transmisión.
- También en el futuro, se podrían abordar varios estudios adicionales que ampliarán los conocimientos sobre el efecto corona y sus impactos, tanto en el rendimiento de las líneas aéreas como en su entorno. Uno de los trabajos futuros más relevantes sería la investigación sobre la *disminución del ruido audible* generado por el efecto corona, especialmente en sistemas de corriente alterna (AC) y corriente continua (DC). El ruido corona es un fenómeno bien conocido por su impacto acústico, y una mayor comprensión de su origen y métodos de mitigación permitiría mejorar la calidad de vida en áreas cercanas a líneas aéreas de alta tensión. Este trabajo podría implicar el desarrollo de *nuevas técnicas de diseño* o el uso de materiales aislantes y configuraciones de conductores que minimicen las descargas parciales que generan el ruido.
- Otro estudio importante sería el *análisis y reducción de las pérdidas corona* en sistemas de transmisión de energía, lo cual es crucial tanto para mejorar la eficiencia de las líneas de alta

tensión como para reducir el impacto ambiental asociado a la disipación de energía. La corona produce pérdidas de energía que, si no se gestionan adecuadamente, pueden representar una parte significativa de las pérdidas totales en las líneas de transmisión. En este sentido, sería útil investigar *nuevas tecnologías y materiales avanzados* que puedan reducir las pérdidas asociadas al efecto corona, mejorando así el rendimiento global del sistema eléctrico. Además, sería relevante estudiar el impacto del efecto corona en *líneas aéreas de corriente continua (DC)*, dado que este fenómeno puede tener un comportamiento diferente bajo este tipo de corriente. La comparación de los efectos de la descarga corona en AC versus DC podría abrir nuevas oportunidades para optimizar el diseño y la operación de sistemas de transmisión tanto en corriente alterna como continua.

Capítulo 7

Anexos

7.1. Diseño y construcción de la jaula corona

A continuación se presentan imágenes de distintas jaulas corona reportadas en los artículos usados para esta memoria.



Figura 7.1: Imagen de referencia de jaula corona [25]



Figura 7.2: Imagen de referencia de jaula corona [26].



Figura 7.3: Imagen de referencia de jaula corona [?].

7.2. Modelo experimental

7.2.1. Aislador



Figura 7.4: Clase del aislador

7.2.2. Tensor ocupado en las pruebas



Figura 7.5: Tensor ocupado durante los ensayos

7.2.3. Conductores usados en las pruebas



Figura 7.6: Conductor de cobre utilizado para las pruebas.



Figura 7.7: Conductor de aluminio utilizado para las pruebas.

7.2.4. Transformador ocupado en las pruebas



Figura 7.8: Transformador utilizado en los ensayos



Figura 7.9: Placa del transformador AEG utilizado en las pruebas.

7.3. Análisis de resultados

7.3.1. Gráficas con conductor de aluminio usando $R_{sh1} = 4239 [\Omega]$

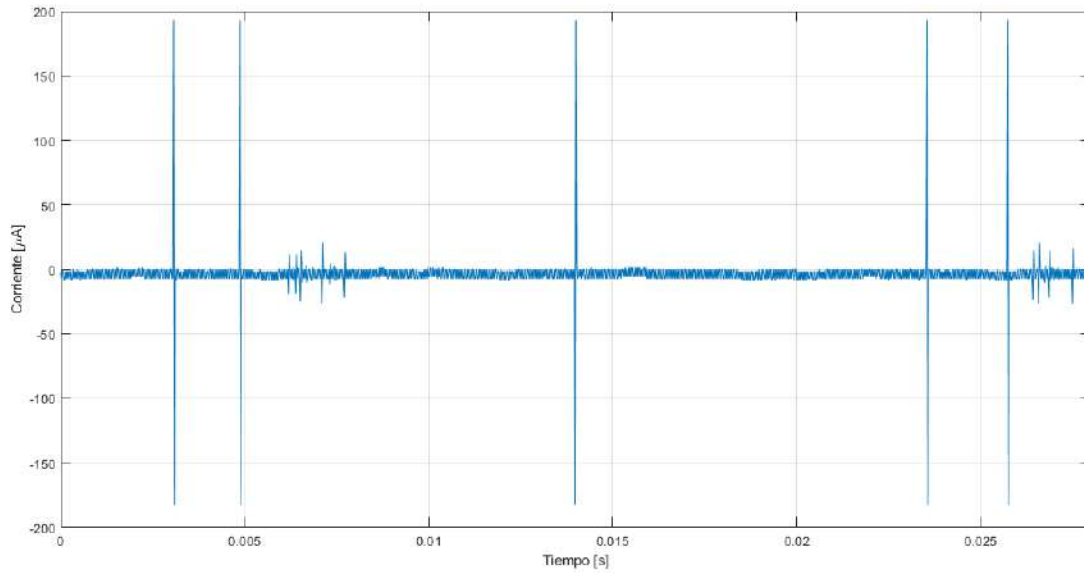


Figura 7.10: Corriente de fuga en conductor de aluminio usando $R_{sh2} = 4239 [\Omega]$ (Elaboración propia).

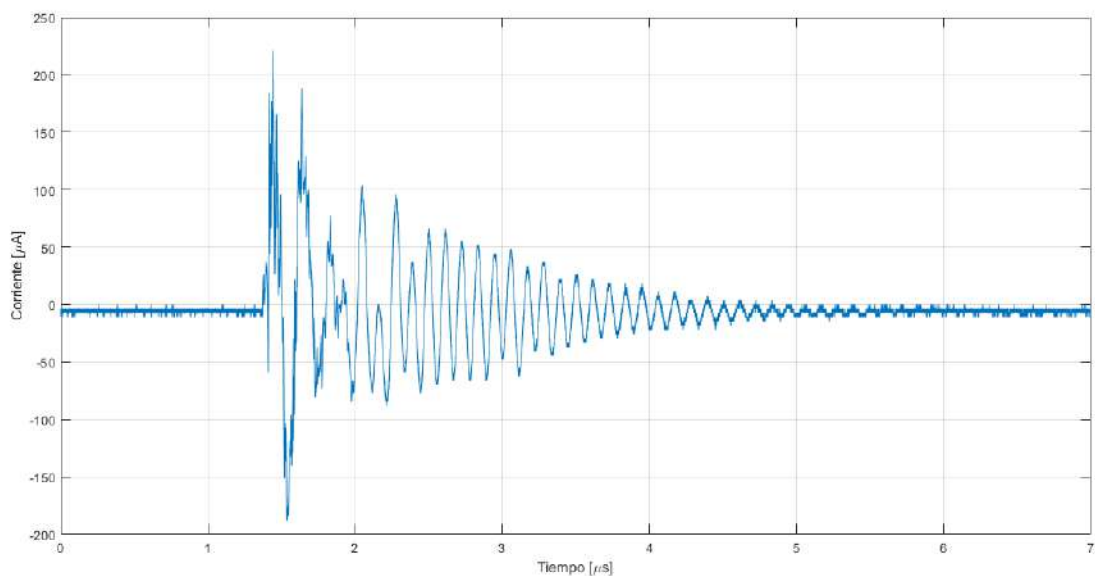


Figura 7.11: Acercamiento de pulso de corriente en conductor de aluminio usando $R_{sh1} = 4239 \text{ } [\Omega]$ a 100 [kV] (Elaboración propia).

7.3.2. Gráficas con conductor de cobre usando $R_{sh1} = 4239 \text{ } [\Omega]$

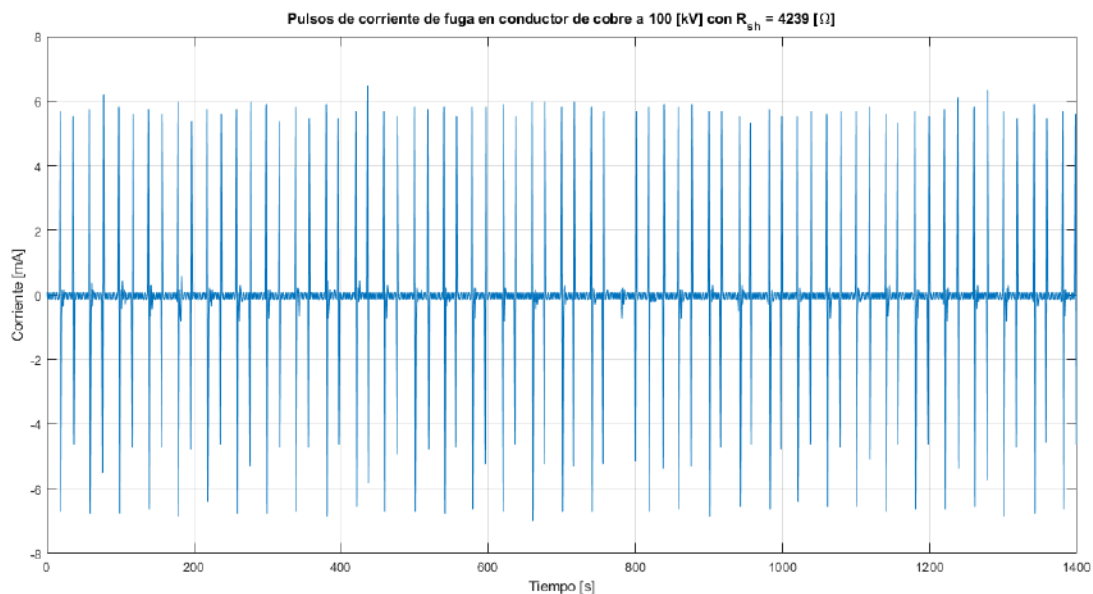


Figura 7.12: Corriente de fuga en conductor de cobre usando $R_{sh2} = 4239 \text{ } [\Omega]$ (Elaboración propia).

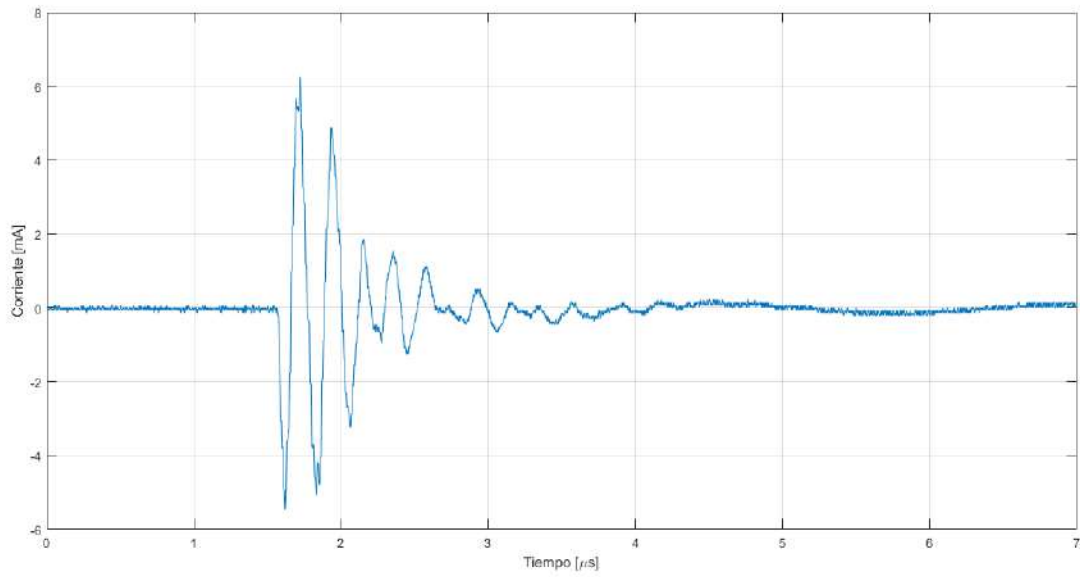


Figura 7.13: Acercamiento de pulso de corriente en conductor de cobre usando $R_{sh1} = 4239 \text{ } [\Omega]$ a $100 \text{ } [\text{kV}]$ (Elaboración propia).

Bibliografía

- [1] R. F. S. Saavedra. Implementación de un modelo a escala para el estudio del efecto corona y medición de sus pérdidas según diversas condiciones y calidad del aire. Master's thesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2015.
- [2] Wited. Climas y paisajes de Chile. <https://www.wited.com/climas-y-paisajes-de-chile/>, s.f.
- [3] Voltimum España. El efecto corona en las líneas eléctricas. <https://www.voltimum.es/articulos-tecnicos/efecto-corona-lineas>, 2017.
- [4] Yu D. Meng X. Macalpine M. Wang L. Guan Z. Yao W. Zhao S. Bian, X. Corona-generated space charge effects on electric field distribution for an indoor corona cage and a monopolar test line. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011.
- [5] Cursos Tesla. 6 efectos que produce el efecto corona en líneas de transmisión. <https://cursostesla.com/6-efectos-que-produce-el-efecto-corona-en-lineas-de-transmision/>, s.f.
- [6] Gobierno de Chile, Ministerio del Medio Ambiente. Decreto supremo n° 38: Establece norma de emisión de ruidos generados por fuentes que indica. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1030781>, 2012. Elaborado a partir de la revisión del Decreto N° 146 de 1997 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
- [7] Servicio de Evaluación Ambiental. Consideraciones para la predicción y evaluación de las emisiones de ruido audible asociado al efecto corona en proyectos de transmisión eléctrica. <https://www.sea.gob.cl>, 2023. Documento técnico del Gobierno de Chile.
- [8] J. S. Djeumen, J. J. Walker, and N. J. West. Measurement of space charge distribution in a corona cage under influence of different atmospheric conditions. In *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2018.

- [9] Shaohua You, Fangcheng Lü, Yunpeng Liu, Wenfang Zeng, and Xiangyuan Wu. Discussion on problems of single conductor small corona cage's design. In *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, 2011.
- [10] G.C. Sibilant, N.M. Ijumba, and A.C. Britten. Studies of dc conductor corona in a small corona cage. In *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, volume 4, 2002.
- [11] Zaengl W. S. Kuffel J. Kuffel, E. *High Voltage Engineering: Fundamentals (2nd ed.)*. Butterworth-Heinemann., 2000.
- [12] Nelson Morales Osorio. Fenómeno corona en líneas aéreas. Manuscrito, 2006. Documento interno, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [13] Sarma Maruvada P. *Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines*. Research Studies Press LTD, 2000.
- [14] M. Khalifa. *High-Voltage Engineering: Theory and Practice*. Marcel Dekker, 1990.
- [15] J. L. Dinamarca. Apuntes “técnicas de alta tensión”, 2007. Apuntes de curso.
- [16] Y. P. Raizer. *Gas Discharge Physics*. Springer, Berlin, Germany, 1991.
- [17] D. B. Gutierrez. Propuesta de guía para la evaluación del impacto acústico generado por líneas de transmisión eléctricas de alta tensión alterna, en el marco del seia. Master's thesis, Universidad de Santiago de Chile, 2011.
- [18] M. J. Lekganyane, N. M. Ijumba, and A. C. Britten. Corona audible noise measurements in a small indoor corona cage under hvdc voltages. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20, 2013.
- [19] F. W. Peek. *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1929.
- [20] G. Markt and B. Mengele. *Drehstromfernübertragung mit Bündelleitern*. Springer-Verlag, Wien, 1987.
- [21] Jorge Follia. Revisión de procedimientos de cálculo de radio-interferencia producido por líneas de e.a.t. Memoria para optar al título de ingeniero civil electricista, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Santiago, Chile, 1982.

- [22] Jian Tang, Jinliang He, Yingjian Yang, Xiong Wu, and Shaoshi Ma. Design of 1000-kv ultra-high voltage ac corona test cage in china. In *Proceedings of the 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pages 141–144, Zurich, Switzerland, 2009.
- [23] N.G. Trinh and P.S. Maruvada. A method of predicting the corona performance of conductor bundles based on cage test results. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1977.
- [24] N. M. Ijumba, M. J. Lekganyane, and A. C. Britten. Comparative studies of dc corona losses in a corona cage and a point-plane gap. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007.
- [25] Xingming Bian, Lan Chen, Deming Yu, J.M. K. MacAlpine, Liming Wang, Zhicheng Guan, Fangdong Chen, Wenjun Yao, and Shuzhen Zhao. Influence of aged conductor surface conditions on ac corona-generated audible noise with a corona cage. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(6), 2012.
- [26] Xin Qi, Tiebing Lu, Wenzuo Ma, Lu Wang, Shuai Sun, and Xingming Bian. Study of the contamination thicknesses effects on dc corona streamer pulses based on a corona cage. In *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, 2015.
- [27] Aytug Font, Yusuf Tugra Solak, Suat Ilhan, Aydogan Ozdemir, Hasbi Ismailoglu, and Fermín Espino Cortes. Dc corona characteristics derived from corona cage tests and simulations. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 26, 2019.
- [28] V. Megala and C. Pugazhendhi Sugumaran. Enhancement of corona onset voltage using pi/mwcnt nanocomposite on hv conductor. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 48(4), 2020.
- [29] Elexor Chile. *Aisladores Polimérico de silicona Suspensión-Retención*. Elexor Chile, 2024.
- [30] PLP Brasil. *Catálogo de Productos: Líneas de Transmisión de Energía Eléctrica de Alta y Extra-Alta Tensión*. Preformed Line Products Company, Cajamar, São Paulo, Brasil, 2022. Disponible bajo solicitud a través de www.plp.com.br.
- [31] Nexans Chile. *Ficha técnica: Conductor desnudo de cobre duro 500 kcmil 37H (Clase A y B)*. Nexans Chile, 2024. Disponible en: <https://www.nexans.cl>.
- [32] Plastigen S.A. *Ficha técnica TECHNYL: Poliamida tipo 6.6*. Plastigen S.A., Santiago, Chile, 2022. Disponible en: Camino Lo Boza 370, Pudahuel, Santiago. Contacto: contacto@plastigen.cl.

- [33] M. S. Naidu and V. Kamaraju. *High Voltage Engineering*. McGraw-Hill Education, 5th edition, 2013.
- [34] I. Gallimberti. A physical analysis of corona discharge. *Reviews of Modern Physics*, 44(2):321–382, 1972.
- [35] International Copper Association. Innovations in copper: Micro-alloyed copper for overhead lines, 2021. Accessed: 2025-05-25.
- [36] M. Gomez and M.H. Staia. Surface oxide formation during corona discharge treatment of aa 1050 aluminium surfaces. *Applied Surface Science*, 183(1-2):69–76, 2001. Accessed: 2025-05-25.