



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

**CUANTIFICACIÓN DEL EFECTO CORONA DE DIFERENTES
GEOMETRÍAS DE CONDUCTORES Y CONDICIONES DE SU
SUPERFICIE, A PARTIR DE MEDICIONES DE CORRIENTE
DE CORONA Y RUIDO AUDIBLE, UTILIZANDO UNA JAULA
DE CORONA DE HASTA 100 KV.**

Nombre:

Nicolhas Rodrigo González Castro

Rol:

201623015-7

Trabajo para optar al título de:

Ingeniero Electricista

Profesor Guía:

Johny Hernán Montaña Chaparro

Profesor Correferente:

Roger Steffan Schürch Brandt

Valparaíso, enero, 2026

Campus Casa Central



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: **CUANTIFICACIÓN DEL EFECTO CORONA DE DIFERENTES GEOMETRÍAS DE CONDUCTORES Y CONDICIONES DE SU SUPERFICIE, A PARTIR DE MEDICIONES DE CORRIENTE DE CORONA Y RUIDO AUDIBLE, UTILIZANDO UNA JAULA DE CORONA DE HASTA 100 KV.**

Nombre del candidato(a): Nicolhas Rodrigo González Castro

Carrera / Grado: Ingeniero Electricista

Campus: Casa Central

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 (marcar una opción)

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 (**marcar una opción**):

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: 23 de enero de 2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: **23 de enero del 2026**

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.

Unidos, abrazamos nuestro deber. La luz se halló a sí misma e iluminó nuestro destino.

La Ciudad del Gran Espíritu, la isla que es mi hogar, reencontrada.

Nuevas leyendas surgen, pero las viejas lecciones deben ser recordadas.

Ese es el lema de los BIONICLE.

Vakama.

Agradecimientos

Luego de un largo camino, quiero dedicar unas palabras a las personas que me ayudaron a llegar hasta aquí.

En primer lugar, deseo agradecer a mi compañero Álvaro Bozo, ya que gracias a su memoria se abrió la oportunidad de desarrollar la mía. Junto con ello, agradezco a mi profesor guía, Johny Montaña, y a mi profesor correferente, Roger Schurch, por el apoyo y los consejos brindados durante la realización de este trabajo. En especial, agradezco al profesor Johny por su constante disposición, incluso los fines de semana, para que pudiera completar las mediciones. En relación con las mediciones, extiendo mi agradecimiento al equipo de pañol: Cristian Andrades, Claudio Ramos y Cristian Videla, por su ayuda en el montaje y desmontaje del set up, por acceder a cada solicitud de cambio de conductor y por aclarar las dudas que iban surgiendo durante las pruebas. Agradezco también a mis amigos de la universidad, con quienes formé recuerdos muy valiosos a lo largo de estos años; sin ellos, el paso por la Universidad no habría sido ni el asomo de lo entretenido y significativo que fue. Asimismo, agradezco a mis compañeros de laboratorio que me acompañaron y apoyaron mientras realizaba las mediciones.

Quiero agradecer profundamente a mi familia por acompañarme en todo este proceso, durante el desarrollo de esta memoria como a lo largo de mi carrera. A mis abuelitos, por todo su cariño, su apoyo incondicional y regalame cuando más lo necesitaba, estando siempre disponibles para conversar y escucharme. A mis tíos y tías, en especial a mi tío Vicente y a mi madrina Sandra, por abrirme las puertas de sus casas durante estos años para que pudiera realizar prácticas y cursar asignaturas. Agradezco también a mis suegros, por sus palabras de ánimo cada vez que los visitaba y por el apoyo logístico, incluso ayudando a transportar vigas para el desarrollo de esta memoria.

De manera muy especial, quiero agradecer a mis padres, a mi hermano y a mi pareja. A mi papá, David González Zamorano, le doy las gracias por sus consejos, su apoyo, su disposición permanente y por estar siempre ahí para escucharme, permitiéndome contarle lo que ocurre y dándome su opinión para enfrentar de mejor manera cada desafío. Agradezco incluso esas preguntas “obvias” que a veces me hacían enojar, pero que después me ayudaban a reflexionar, y, sobre todo, el poder confiar en que siempre estará presente. A mi mamá, Dhyann Castro Koller, le agradezco por estar siempre a mi lado, preocuparse por mí y apoyarme en cada paso hasta llegar a este momento; por escucharme aunque no entendiera del todo lo que le explicaba, por sacarme una sonrisa en los momentos difíciles, por todo su amor y comprensión cuando sentía que no podía más, y por cada palabra de ánimo que me ha permitido seguir adelante. A mi hermano, David González Castro, le agradezco por todo su amor y cariño; aunque sea más pequeño, su apoyo ha sido lo mejor del mundo cuando me abraza al notar que estoy mal, cuando me anima y me acompaña en mis distracciones para hacer más llevaderos los días. Gracias por ser el mejor compañerito del mundo. Por último, quiero agradecer a mi pareja, Tania Riquelme Vilches, por todo su amor, su apoyo incondicional y su ánimo eterno. Gracias por cada día de conversaciones, por escuchar cada explicación, aunque no siempre sea fácil de entender, y aun así apoyarme; por ser mi compañera en todas, por caminar a mi lado, por ayudarme a despejar la mente cuando una nube negra parecía estar encima, por preocuparse siempre de que esté bien y por creer en que podremos seguir caminando juntos en el futuro.

Finalmente, quiero agradecer a diosito por haberme encaminado para poder finalizar este proceso. Reitero mi agradecimiento a todas las personas que formaron parte de mi desarrollo estudiantil y humano, y que contribuyeron, con su granito de arena, a que hoy pueda convertirme en profesional. A todas y todos, les envío un gran abrazo y mi más sincero agradecimiento.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivo General	3
1.3. Objetivos Específicos	3
2. Marco teórico	4
2.1. Resumen	4
2.2. Efecto corona	4
2.2.1. Introducción al efecto corona	4
2.2.2. Naturaleza del efecto corona	5
2.2.3. Corona en AC	6
2.2.4. Manifestación del efecto corona	6
2.2.5. Factores que afectan al efecto corona	12
2.3. Jaula corona	16
2.3.1. Principio de funcionamiento	16
2.3.2. Condiciones de prueba y medición con la jaula corona	17
3. Metodología experimental	18
3.1. Montaje experimental	18
3.1.1. Montaje inicial	18
3.1.2. Montaje actualizado	19
3.2. Elección de conductores y recubrimientos	21
3.3. Protocolo de medición	22
3.3.1. Medición de corriente de corona	23
3.3.2. Medición de ruido audible	24
4. Modelo de análisis	26
4.1. Corriente corona	26

4.1.1.	Análisis de la corriente de corona	26
4.1.2.	Análisis cromático	27
4.2.	Ruido audible de corona	28
4.3.	Corriente <i>peak</i> con ruido audible	29
5.	Resultados y análisis	30
5.1.	Preámbulo	30
5.2.	Corriente de corona	31
5.2.1.	Análisis a partir de <i>peak</i> de corriente	32
5.2.2.	Análisis de corriente a partir de modelo cromático	35
5.3.	Ruido audible	44
5.3.1.	Comparación para diferentes topologías de conductores	44
5.3.2.	Comparación para el conductor con diferentes condiciones superficiales	46
5.4.	Análisis <i>peak</i> de corriente, junto al ruido audible.	49
5.4.1.	Comparación para diferentes topologías de conductores	49
5.4.2.	Comparación para el conductor con diferentes condiciones superficiales	52
6.	Conclusiones	56
6.1.	Trabajos futuros	58

Índice de tablas

1.	Nomenclatura utilizada en el estudio	viii
2.1.	Valor del coeficiente de estado de superficie del conductor m para distintas condiciones .	13
2.2.	Movilidad iónica según material	14
3.1.	Características de los conductores eléctricos seleccionados.	21
3.2.	Condiciones superficiales del conductor a ensayar.	21
5.1.	Mediciones de ruido audible [dBA] para diferentes topologías de conductores, medido con sonómetro.	46
5.2.	Mediciones de ruido audible [dBA] para el conductor con diferentes condiciones superficiales, medido con sonómetro.	48
6.1.	Mediana de corriente <i>peak</i> de corona para distintas topologías de conductores a diferentes tensiones.	64
6.2.	Mediana de corriente <i>peak</i> de corona para Cairo con distintos recubrimientos a diferentes tensiones.	65

Índice de figuras

2.1. Esquema/imagen ilustrativa del efecto corona	5
2.2. La corona solar y sus capas externas.	5
2.3. Efecto corona en líneas de transmisión	7
2.4. Espectro de frecuencia de ruido audible (AN) durante lluvia para una línea UHV con un haz de 4×2 pulgadas.	9
3.1. Modelo experimental utilizado para la realización de mediciones	19
3.2. Montaje actualizado utilizado para la realización de mediciones (elaboración propia). . .	20
3.3. Sonómetro (elaboración propia).	25
3.4. Micrófono conectado al sonómetro (elaboración propia).	25
3.5. Equipo de calibración del sonómetro (elaboración propia).	25
5.1. Forma de onda de corriente para el conductor Cairo (19,88 mm) a 100 kV, (Elaboración propia).	31
5.2. Forma de onda de corriente para el conductor Alliance (14,33 mm) a 100 kV, (Elaboración propia).	32
5.3. Representación de los diferentes valores de corriente <i>peak</i> en diferentes topologías de conductores, (Elaboración propia).	33
5.4. Representación de los diferentes valores de corriente <i>peak</i> para diferentes condiciones superficiales en el conductor, (Elaboración propia).	33
5.5. Análisis cromático para diferentes topologías de conductores a 60 kV, (Elaboración propia).	36
5.6. Análisis cromático para diferentes topologías de conductores a 70 kV, (Elaboración propia).	36
5.7. Análisis cromático para diferentes topologías de conductores a 80 kV, (Elaboración propia).	36
5.8. Análisis cromático para diferentes topologías de conductores a 90 kV, (Elaboración propia).	36
5.9. Análisis cromático para diferentes topologías de conductores a 100 kV, (Elaboración propia).	37
5.10. Análisis cromático para conductor Cairo sin recubrimientos, (Elaboración propia).	37
5.11. Análisis cromático para conductor Cobre, (Elaboración propia).	37
5.12. Análisis cromático para conductor Flint, (Elaboración propia).	37

5.13. Análisis cromático para conductor Alliance, (Elaboración propia).	38
5.14. Análisis cromático para conductor Coreopsis, (Elaboración propia).	38
5.15. Análisis cromático para el conductor con diferentes condiciones superficiales a 50 kV, (Elaboración propia).	40
5.16. Análisis cromático para el conductor con diferentes condiciones superficiales a 60 kV, (Elaboración propia).	40
5.17. Análisis cromático para el conductor con diferentes condiciones superficiales a 70 kV, (Elaboración propia).	40
5.18. Análisis cromático para el conductor con diferentes condiciones superficiales a 80 kV, (Elaboración propia).	40
5.19. Análisis cromático para el conductor con diferentes condiciones superficiales a 90 kV,(Elaboración propia).	40
5.20. Análisis cromático para el conductor con diferentes condiciones superficiales a 100 kV, (Elaboración propia).	40
5.21. Análisis cromático para conductor Cairo con Arena, (Elaboración propia).	41
5.22. Análisis cromático para conductor Cairo con Agua con sal, (Elaboración propia).	41
5.23. Análisis cromático para conductor Cairo con Agua de la llave, (Elaboración propia).	41
5.24. Análisis cromático para conductor Cairo con Agua de lluvia, (Elaboración propia).	41
5.25. Análisis cromático para conductor Cairo con Aceite, (Elaboración propia).	41
5.26. Análisis cromático para conductor Cairo con Cinta aislante, (Elaboración propia).	41
5.27. Ruido corona captado por sonómetro en dBA para diferentes topologías de conductores, (Elaboración propia).	44
5.28. Ruido corona captado por sonómetro en dBA para el conductor con diferentes condiciones superficiales, (Elaboración propia).	47
5.29. Representación de nivel sonoro y corriente <i>peak</i> para las diferentes topologías de conduc- tores en las distintas tensiones de operación, (elaboración propia).	49
5.30. Variación de la corriente <i>peak</i> y el ruido audible para el conductor Alliance, (elaboración propia).	50
5.31. Variación de la corriente <i>peak</i> y el ruido audible para el conductor Cairo, (elaboración propia).	50
5.32. Variación de la corriente <i>peak</i> y el ruido audible para el conductor Cobre, (elaboración propia).	50
5.33. Variación de la corriente <i>peak</i> y el ruido audible para el conductor Flint, (elaboración propia).	50
5.34. Variación de la corriente <i>peak</i> y el ruido audible para el conductor Coreopsis, (elaboración propia).	51

5.35. Representación de nivel sonoro y corriente <i>peak</i> para las diferentes condiciones superficiales en las distintas tensiones de operación, (elaboración propia).	52
5.36. Variación de la corriente <i>peak</i> y el ruido audible para la condición superficial de Agua contaminada, (elaboración propia).	53
5.37. Variación de la corriente <i>peak</i> y el ruido audible para la condición superficial de Agua de la llave, (elaboración propia).	53
5.38. Variación de la corriente <i>peak</i> y el ruido audible para la condición superficial de Agua lluvia, (elaboración propia).	53
5.39. Variación de la corriente <i>peak</i> y el ruido audible para la condición superficial de Arena, (elaboración propia).	53
5.40. Variación de la corriente <i>peak</i> y el ruido audible para la condición superficial de Aceite, (elaboración propia).	54
5.41. Variación de la corriente <i>peak</i> y el ruido audible para la condición superficial de Cinta aislante, (elaboración propia).	54

Nomenclatura

Tabla 1: Nomenclatura utilizada en el estudio

Sigla	Concepto
AC	Corriente Alterna
DC	Corriente Continua
AN	Ruido audible
RIV	Interferencia de Radio Frecuencia
TVI	Interferencia de televisión
CL	Pérdidas por Corona
DP	Descarga Parcial
E_c	Campo superficial crítico
E_{sup}	Campo superficial
V_c	Tensión Crítica
E_b	Energía de la señal
f_c	Frecuencia Central
B	Ancho de banda
<i>NPC</i>	Niveles Máximos Permisibles de Presión Sonora Corregidos
°C	Grados Celcius
kV	kilo Volts
mmHg	Milímetros de mercurio
kV/cm	Kilo Volts por centímetro
rms	Valor cuadrático medio
in	Pulgada
A	Ampere
dBA	Decibelios A
MHz	Mega Hertz
Set up	Ensamble de la jaula corona

Resumen

El efecto corona es un fenómeno eléctrico observable en conductores de centrales eléctricas, subestaciones y líneas de transmisión. Se produce cuando el gradiente de potencial superficial del conductor supera la intensidad crítica del aire. Esto desencadena una ionización por colisión en las inmediaciones del conductor que, sin llegar a una ruptura total, genera descargas parciales y corrientes de fuga localizadas, resultando en pérdidas de energía, ruido audible y emisiones luminosas.

El estudio de este fenómeno permite comprender su interacción con los equipos y sistemas eléctricos, así como diseñar estrategias de mitigación. En este trabajo se cuantifica el efecto corona en diferentes tipos de conductores y condiciones superficiales, mediante mediciones de corriente de fuga y ruido audible en una jaula corona alimentada con tensión AC.

El experimento consideró cinco conductores de distintos diámetros y siete condiciones superficiales. El análisis se estructuró en tres etapas:

- Análisis de la corriente de fuga, evaluando los *peaks* de corriente asociados a cada conductor y condición superficial.
- Análisis cromático, caracterizando las señales a partir de la energía total (E_b), frecuencia central (f_c) y ancho de banda (B).
- Análisis del ruido audible, relacionando las emisiones acústicas con las condiciones físicas de los conductores y las diferentes condiciones superficiales empleadas.

Los resultados muestran que el diámetro, el estado superficial y el material del conductor son factores determinantes en la aparición del efecto corona. En particular, un aumento del diámetro tiende a reducir su aparición, mientras que el deterioro de la superficie y un material inadecuado la incrementan. Además, bajo los 80 kV, la mayoría de las condiciones superficiales evaluadas intensifican el efecto corona en comparación con el conductor sin recubrimiento. Esta tendencia se mantiene sobre los 80 kV, donde ahora todos los recubrimientos presentan un desempeño inferior; por lo tanto, la opción más eficiente es el conductor sin recubrimiento y con un buen estado superficial.

Se concluye que mantener el conductor en óptimas condiciones y evitar recubrimientos que incrementen el gradiente superficial permite reducir significativamente la generación de nuevos focos y la manifestación del efecto corona.

Abstract

The corona effect is an electrical phenomenon observable on conductors of power plants, substations, and transmission lines. It occurs when the conductor's surface potential gradient exceeds the critical field strength of the air. This triggers collision ionization in the immediate vicinity of the conductor, which, without reaching a complete breakdown, generates partial discharges and localized leakage currents, resulting in energy losses, audible noise, and luminous emissions.

The study of this phenomenon allows for understanding its interaction with electrical equipment and systems, as well as designing mitigation strategies. In this work, the corona effect is quantified across different conductor types and surface conditions through leakage current and audible noise measurements in a corona cage supplied with AC voltage.

The experiment considered five conductors of different diameters and seven surface conditions. The analysis was structured in three stages:

- Leakage current analysis, evaluating the current peaks associated with each conductor and surface condition.
- Chromatic analysis, characterizing the signals based on total energy (E_b), center frequency (f_c), and bandwidth (B).
- Audible noise analysis, correlating acoustic emissions with the physical properties of the conductors and the different surface conditions employed.

The results demonstrate that the diameter, surface condition, and conductor material are determining factors in the onset of the corona effect. Specifically, an increase in diameter tends to mitigate its onset, whereas surface deterioration and unsuitable materials exacerbate it. Furthermore, below 80 kV, most of the evaluated surface conditions intensify the corona effect compared to the bare conductor. This trend persists above 80 kV, where all coatings exhibit inferior performance; consequently, the most efficient option is the bare conductor in good surface condition.

It is concluded that maintaining the conductor in optimal conditions and avoiding coatings that increase the surface gradient allows for significantly reducing the generation of new discharge sources and the manifestation of the corona effect.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

El efecto corona es una descarga parcial que se manifiesta en sistemas de alta tensión cuando el estrés eléctrico en la superficie del conductor excede la rigidez dieléctrica del aire circundante. Al aumentar la tensión, el campo eléctrico acelera los electrones libres presentes, otorgándoles suficiente energía cinética para ionizar moléculas neutras mediante colisiones inelásticas. Este mecanismo, conocido como proceso de avalancha, genera una región de plasma conductor confinada alrededor del conductor que permite el flujo de pulsos de corriente hacia el aire sin provocar un cortocircuito [1].

Las manifestaciones físicas de este proceso incluyen un halo luminoso, interferencia electromagnética, generación de ozono y ruido audible. Si bien es un fenómeno inherente a la alta tensión, representa un problema técnico y económico significativo, ya que estas descargas provocan pérdidas activas de energía y, por ende, una reducción en la eficiencia de transmisión. Adicionalmente, la contaminación acústica resultante puede afectar a la población ubicada en las cercanías de las instalaciones. Por este motivo, la comprensión y cuantificación del efecto corona se han convertido en aspectos clave para el diseño, mantenimiento y optimización de las redes eléctricas de potencia [1, 2].

Uno de los equipos experimentales empleados para el estudio del efecto corona es el uso de jaulas corona, dispositivos que permiten realizar mediciones controladas de corriente de corona y ruido audible en condiciones reproducibles. Estas jaulas ofrecen la posibilidad de analizar distintos tipos de conductores y estados superficiales, minimizando la influencia de variables externas y facilitando la comparación entre configuraciones [3, 4].

En el presente trabajo se cuantifica el efecto corona en diferentes topologías de conductores y condiciones superficiales, evaluando el impacto del material, el diámetro y los recubrimientos sobre las

mediciones de corriente de corona y ruido audible bajo tensión alterna (AC). Para ello, se utilizó una jaula corona capaz de soportar tensiones de hasta 100 kV AC, equipada con una resistencia *shunt* para la detección de corrientes y un sistema de medición de audio para registrar el ruido asociado al fenómeno.

El análisis se estructura en tres ejes principales:

1. Evaluación de la corriente de fuga, con el objetivo de identificar los *peaks* de corriente y su relación con la tensión aplicada y el estado superficial del conductor.
2. Análisis cromático, destinado a caracterizar las señales en términos de energía total (E_b), frecuencia central (f_c) y ancho de banda (B), con el fin de asociar estos parámetros a los diferentes niveles de efecto corona observados.
3. Estudio del ruido audible, correlacionando su aparición y magnitud con las condiciones físicas, eléctricas y ambientales de los conductores evaluados.

Los resultados obtenidos permiten proponer una geometría y una composición superficial óptima del conductor, de modo que se minimicen tanto las pérdidas energéticas como el ruido audible generado.

En última instancia, esta memoria pretende aportar recomendaciones prácticas para la selección de materiales y recubrimientos que permitan mitigar el efecto corona en sistemas de alta tensión, mejorando la eficiencia energética y la continuidad operacional del sistema eléctrico, al mismo tiempo que se reducen los impactos ambientales y acústicos asociados a su operación.

1.2. Objetivo General

Cuantificar el efecto corona en diferentes topologías de conductores y diferentes condiciones en su superficie, a partir de mediciones de corriente de corona y ruido audible ante excitación AC, utilizando una jaula de corona en un ambiente de laboratorio.

1.3. Objetivos Específicos

1. Seleccionar diferentes topologías de conductores y composiciones superficiales, que puedan ser probados en la jaula corona del laboratorio de alta tensión para cuantificar el efecto corona.
2. Realizar mediciones de corriente corona y ruido audible ante excitación AC, utilizando la jaula de corona de hasta 100 kV, a los diferentes conductores y composiciones superficiales de estos.
3. Analizar las mediciones de corriente de corona y ruido audible comparando los resultados de las diferentes configuraciones y composiciones superficiales de estos.
4. Sugerir una geometría y/o composición superficial de conductores que presente menor efecto corona basado en las mediciones de corriente y ruido.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Resumen

En este capítulo se establece una base teórica sobre el fenómeno corona. En primer lugar, se presenta una introducción al efecto, describiendo su naturaleza, sus formas de manifestarse y los principales factores que lo afectan. Posteriormente, se aborda la jaula corona, detallando su principio de funcionamiento, las condiciones de prueba que deben mantenerse y los procedimientos de medición asociados.

2.2. Efecto corona

2.2.1. Introducción al efecto corona

El efecto corona (Figura 2.1), denominado así por su similitud con el resplandor o corona que rodea al Sol (Figura 2.2), observable únicamente durante un eclipse total, es una descarga parcial que se produce en la superficie de los conductores de las centrales eléctricas, subestaciones y líneas de transmisión. Este fenómeno ocurre cuando la tensión eléctrica, es decir, el campo eléctrico o gradiente de potencial superficial del conductor, supera la rigidez dieléctrica del aire circundante (aproximadamente 30 kV/cm a presión atmosférica normal) [1, 5].

Bajo estas condiciones, el aire se ioniza y se genera una descarga que produce una corona luminosa alrededor del conductor, acompañada de pérdidas de energía, ruido de tipo zumbido (AN, por sus siglas en inglés), interferencia de radiofrecuencia (RIV, por sus siglas en inglés) e interferencia de televisión (TVI, por sus siglas en inglés). Además, se produce ozono y, en presencia de humedad, ácido nitroso [1, 6].

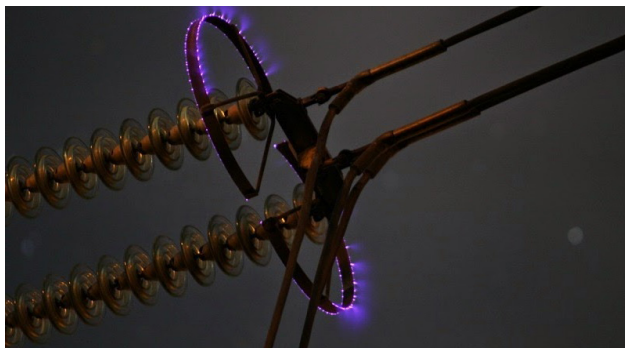


Figura 2.1: Esquema/imagen ilustrativa del efecto corona. Fuente: [7].



Figura 2.2: La corona solar y sus capas externas. Fuente: [8].

2.2.2. Naturaleza del efecto corona

De acuerdo con lo descrito en [1], la corona es una descarga parcial luminosa producida por la ionización del aire que rodea a un conductor cuando se presentan sobretensiones eléctricas. Diversos ensayos muestran que el aire seco, a presión y temperatura normales ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 760 mmHg), posee una rigidez dieléctrica del orden de $29,8\text{ kV/cm}$ (valor máximo o *peak*) o $21,1\text{ kV/cm}$ (valor eficaz o *rms*). Siempre existen algunos electrones libres en el aire debido a la radiación ultravioleta del sol, los rayos cósmicos de origen extraterrestre y la radiactividad natural de la tierra, entre otras fuentes [5].

Cuando el conductor se energiza con tensión alterna, en cada semiciclo los electrones del aire próximos a su superficie se aceleran hacia el conductor durante el semiciclo positivo y se alejan de él durante el semiciclo negativo. La velocidad que adquiere un electrón libre depende de la intensidad del campo eléctrico. Si esta intensidad excede un valor crítico, el electrón adquiere energía suficiente para expulsar un electrón de la órbita externa de un átomo de la molécula de aire. Este proceso se denomina ionización, y el átomo que pierde el electrón se convierte en un ion positivo [1, 2].

El electrón inicial pierde la mayor parte de su velocidad en la colisión y el electrón expulsado de la molécula, que también posee baja velocidad, es nuevamente acelerado por el campo eléctrico. De este modo, cada electrón es capaz de ionizar otra molécula de aire en la siguiente colisión. Tras la segunda colisión ya existen cuatro electrones disponibles para repetir el proceso y, sucesivamente, el número de electrones se duplica en cada etapa. Durante todo este tiempo, los electrones avanzan hacia el electrodo positivo y, después de múltiples colisiones, su número crece de forma exponencial. Este mecanismo se conoce como proceso de avalancha electrónica. Cada avalancha se inicia a partir de un solo electrón libre inmerso en un campo electrostático intenso. Asimismo, debe señalarse que la intensidad del campo alrededor de un conductor no es uniforme[2].

En consecuencia, el campo eléctrico alcanza su máxima intensidad en la superficie del conductor y

decrece con la distancia al centro. Así, a medida que se eleva la tensión aplicado al conductor, se alcanza el campo crítico y las descargas iniciales se producen únicamente en la superficie o muy cerca de ella [1, 2].

2.2.3. Corona en AC

Para una tensión alterna (AC), el gradiente de campo en la superficie del conductor y, por tanto, el campo eléctrico en su región circundante, varía continuamente en el tiempo, cambiando tanto en magnitud como en polaridad. A medida que la tensión aplicada supera el umbral de inicio de corona en cada semiciclo (positivo y negativo), se manifiestan los modos de corona correspondientes. El régimen de corona en AC observado en cada ciclo se asemeja estrechamente a su contraparte en corriente continua (DC), y sus modos pulsantes se encuentran asociados a la frecuencia de la fuente [2, 9].

En particular, durante el semiciclo negativo, cuando el conductor actúa como cátodo, pueden generarse pulsos de Trichel, que constituyen descargas pulsantes características del régimen de corona negativa. Estos pulsos se presentan como ráfagas periódicas de corriente de corta duración (del orden de los microsegundos), producidas por avalanchas electrónicas sucesivas que se inician y extinguen a medida que el campo eléctrico local supera y desciende por debajo del umbral de ionización del aire. La frecuencia de los pulsos de Trichel depende tanto de la tensión instantánea aplicada como de las condiciones ambientales (presión, humedad, temperatura) y del estado superficial del electrodo [10, 11].

En consecuencia, bajo tensión alterna, el semiciclo positivo tiende a presentar una corona luminosa difusa y cuasi continua, similar a la de polaridad positiva en corriente continua, mientras que el semiciclo negativo puede exhibir una descarga pulsante tipo Trichel. Esta diferencia da lugar a una asimetría temporal en la forma de onda de la corriente de corona [10, 11].

2.2.4. Manifestación del efecto corona

El efecto corona puede manifestarse de diferentes formas:

Corona visible

La primera y más representativa es la corona visual (Figura 2.3), que aparece como un brillo violeta-azulado y/o como un resplandor alrededor del conductor, concentrado principalmente en las irregularidades de su superficie [1, 12].

Este brillo es generado por fotones que no son absorbidos por las moléculas de aire. Dichos fotones se emiten cuando los electrones de las órbitas más externas de las moléculas son elevados a un nivel superior de energía y posteriormente regresan a estados de menor energía. Estudios de los espectros de emisión de la descarga corona (Grum y Costa, 1976) indican que la mayor parte de la luz se emite desde moléculas de nitrógeno excitadas [2].

La corona visual puede clasificarse en tres tipos [12]:

- **Descarga luminiscente (Glow discharge):** corresponde a una descarga de polaridad negativa, generada a 25 °C cuando el gradiente de tensión alcanza aproximadamente 20 kV_{rms}/cm. No produce ruido audible ni interferencias objetables de radiofrecuencia (RIV) ni de televisión (TVI).
- **Descarga en escobilla (Brush discharge):** recibe este nombre porque su apariencia recuerda a las puntas redondeadas de una escobilla de botella. Cuando el gradiente de tensión supera los 25 kV_{rms}/cm se produce una descarga en escobilla de polaridad negativa. Se trata de una corriente que se extiende radialmente desde la superficie del conductor. La longitud de este tipo de descarga depende de la magnitud de la tensión, variando típicamente entre 1 y 2 pulgadas a medida que la tensión aumenta.
- **Descarga de penacho (Plume discharge):** es una descarga de polaridad positiva que se genera cuando el gradiente de tensión es del orden de 30 kV_{rms}/cm. Su nombre se debe a que, en la oscuridad, forma un halo similar a un árbol con tallo y ramas. La longitud del tallo suele variar entre 2,5 cm y varios centímetros, dependiendo de la tensión aplicada, y se caracteriza por un sonido de tipo sibilante.

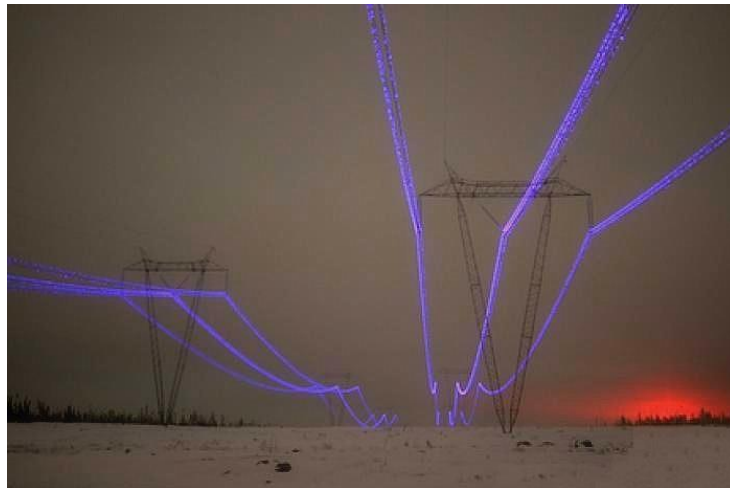


Figura 2.3: Efecto corona en líneas de transmisión [6].

Ruido Audible

La segunda manifestación más representativa del efecto corona es el ruido audible (AN), que se percibe como un silbido o chisporroteo cuando el conductor se energiza por encima del umbral de inicio de corona. El AN es generado por el movimiento rápido de los electrones durante la ionización, lo que provoca una transferencia súbita de energía cinética a las moléculas neutras del aire mediante colisiones.

Esta transferencia es equivalente, a escala microscópica, a pequeñas explosiones locales en la zona donde se origina la corona, dando lugar a la generación de ondas acústicas. En esencia, las descargas de corona constituyen una fuente de pulsos acústicos. Bajo tensión alterna, ráfagas de pulsos acústicos se generan en las proximidades del *peak* de los semiciclos positivos y, adicionalmente, se producen tonos puros a frecuencias correspondientes a los armónicos pares de la frecuencia del sistema [1, 2].

El ruido audible generado por la corona en líneas de potencia presenta dos componentes principales: el ruido de banda ancha y el *hum* (zumbido) [2].

- **Ruido de banda ancha:** este componente posee un contenido de alta frecuencia significativo que lo diferencia del ruido ambiental común. Se generan principalmente por una sucesión aleatoria de pulsos debidos a *streamers* de polaridad positiva (tipo CPE) formados en la superficie de los conductores. Cada *streamer* induce una variación local de presión y, dado que las descargas de distintos *streamers* ocurren en instantes diferentes, sus ondas de presión se superponen, dando origen a un ruido de banda ancha.
- **Hum (zumbido):** el *hum* está directamente relacionado con la frecuencia de la red. Se manifiesta como tonos puros en la frecuencia fundamental y en sus armónicos pares (debido a la simetría del ciclo de la tensión alterna). Se origina en la repetitividad de la actividad de corona asociada al ciclo de la tensión.

Bajo tensión alterna, el comportamiento de ambos componentes es característico. Las ráfagas de pulsos acústicos, asociadas principalmente al ruido de banda ancha, se generan en las cercanías del *peak* de los semiciclos positivos, mientras que la naturaleza periódica de la tensión alterna da lugar a los tonos puros del *hum* en las frecuencias correspondientes a los armónicos pares de la frecuencia del sistema. La diferencia clave entre ambos radica en su relación temporal con la tensión aplicada: el *hum* presenta una fase bien definida respecto de la tensión, mientras que las ondas de banda ancha, originadas por múltiples fuentes aleatorias, se combinan con fases aleatorias [2, 9].

Para analizar el ruido audible en líneas de transmisión se emplean leyes básicas de la acústica, bajo las siguientes suposiciones [9]:

- La corona se distribuye uniformemente a lo largo del conductor, de modo que la generación de AN puede representarse mediante una distribución uniforme de potencia acústica por unidad de longitud.
- El micrófono es ideal y responde de igual manera a las ondas de presión, independientemente del ángulo de incidencia.
- Las ondas sonoras no sufren atenuación apreciable durante su propagación.
- La reflexión en el suelo se considera despreciable.

La Figura 2.4 muestra una porción típica del espectro de ruido aleatorio de banda ancha de AN, medido cerca de una línea de ensayo UHV con un haz de 4×2 pulgadas de subconductores por fase. Los resultados graficados pueden representarse mediante la siguiente ecuación empírica (2.1) [1]:

$$AN = k \cdot n \cdot d^{2,2} \cdot E^{3,6} \quad (2.1)$$

donde:

- k es el coeficiente de proporcionalidad.
- n es el número de subconductores.
- d es el diámetro de los subconductores.
- E es la intensidad de campo en la superficie del conductor (gradiente de potencial).

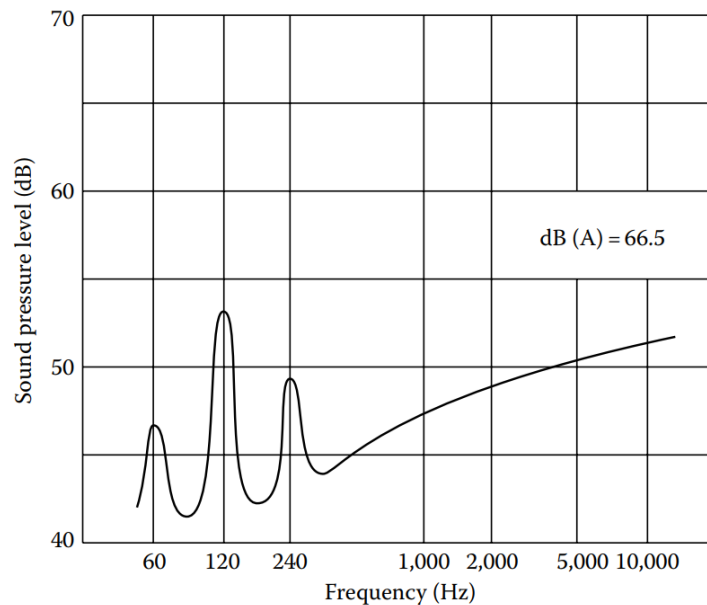


Figura 2.4: Espectro de frecuencia de ruido audible (AN) durante lluvia (ancho de banda de 1/10 de octava, dB por encima de 0,0002 μ bar, radiómetro general) de una línea UHV con un haz de 4×2 pulgadas [1].

Generación de Ozono

La tercera manifestación relevante del efecto corona es la generación de ozono. En la década de 1970, el rápido crecimiento de la transmisión en alta tensión motivó el análisis de la producción de ozono por corona y su posible impacto en la calidad del aire. En este contexto, tanto el ozono como las distintas especies de óxidos de nitrógeno (agrupadas bajo la denominación, NO_x) se incorporaron a la evaluación ambiental de las líneas de transmisión. No obstante, estudios de laboratorio [13] y mediciones realizadas

en líneas en servicio han demostrado que estas instalaciones no contribuyen de forma significativa a los niveles ambientales de ozono [1, 9, 13].

La formación de ozono se describe mediante tres etapas principales: ionización del aire, fragmentación del oxígeno y formación de ozono. La alta tensión aplicada al conductor genera un campo eléctrico lo suficientemente intenso como para desprender electrones de las moléculas presentes en el aire (principalmente nitrógeno y oxígeno), convirtiéndolas en iones. Posteriormente, la energía liberada es suficiente para romper los enlaces del oxígeno diatómico (O_2), produciendo átomos de oxígeno (O) altamente reactivos. Finalmente, estos átomos libres e inestables reaccionan rápidamente con moléculas de O_2 que no han sido afectadas, dando origen a moléculas de ozono (O_3) [13, 14].

Este fenómeno se puede representar de la siguiente forma[13]:

- La ionización del aire y la fragmentación del oxígeno pueden representarse mediante (2.2):



- La formación de ozono se representa mediante (2.3):



donde **M** representa cualquier molécula terciaria (por ejemplo, N_2).

Adicionalmente, pueden generarse distintas especies nitrogenadas (NO , NO_2 , N_2O , N_2O_5 , N_2O_4), formadas a partir de reacciones que involucran nitrógeno atómico y oxígeno molecular [13].

Finalmente, en condiciones normales de temperatura y humedad ambiente, el ozono retorna a oxígeno molecular en un intervalo aproximado de 20 a 30 minutos [13].

Generación de ácido nitroso

La cuarta manifestación relevante del efecto corona es la producción de ácido nitroso, el cual se genera en presencia de humedad y puede provocar corrosión en los conductores cuando el fenómeno alcanza intensidades elevadas [5, 13].

Pérdidas de corona

La quinta manifestación del efecto corona son las pérdidas por corona (CL, por sus siglas en inglés *corona losses*), las cuales se definen como la tasa a la que la energía es extraída de la fuente de alta tensión para sustentar los procesos de descarga, tales como el movimiento de partículas cargadas y sus colisiones con moléculas neutras [1, 2].

En esencia, estas pérdidas se deben principalmente al movimiento de iones positivos y negativos en el campo eléctrico. Aunque durante la descarga se generan electrones libres, su contribución directa a la pérdida total es prácticamente despreciable, debido a que poseen una vida media extremadamente corta antes de adherirse a moléculas neutras y transformarse en iones negativos. En consecuencia, su movimiento sólo genera pulsos de corriente de muy breve duración que no aportan de manera significativa a la pérdida por corona. Cabe señalar, además, que el cálculo o la predicción teórica de CL mediante un enfoque estrictamente analítico aún no se ha logrado con éxito.

Así, la energía suministrada por la fuente de alta tensión se invierte fundamentalmente en movilizar los iones, transformándose finalmente en otras formas de energía, tales como energía electromagnética, acústica (sonido) y electroquímica, las cuales representan únicamente una pequeña fracción de la pérdida total [5, 13, 15].

En tensión alterna (AC), la evaluación de las pérdidas por corona requiere conocer la distribución del campo eléctrico en la vecindad de los conductores (no en todo el espacio interelectrodo, como en DC). Además, las CL están fuertemente influenciadas por el gradiente de superficie del conductor; a medida que dicho gradiente (y, por ende, la tensión de operación) aumenta, las pérdidas se incrementan [9].

Los principales métodos teóricos para el cálculo de las pérdidas por corona son los siguientes (descritos con mayor detalle en [5, 15]):

- **Método de F. W. Peek:** desarrolla fórmulas para el estudio cuantitativo del efecto corona en el caso de cilindros paralelos de superficie lisa.
- **Método de Peterson:** se estructura en tres etapas. La primera consiste en el cálculo de la tensión característica por fase en tres casos; la segunda, en la determinación de la razón entre la tensión fase–neutro U y e_d ; y la tercera, en el cálculo de las pérdidas por corona.
- **Método de Electricité de France:** los investigadores C. Gary y M. Moreau desarrollaron dos métodos para el cálculo de las pérdidas por corona en conductores en haz, uno para condiciones de buen tiempo y otro para condiciones de mal tiempo.

En síntesis, las pérdidas por corona dependen en gran medida de los factores que afectan al efecto corona[15], los cuales se analizan en la siguiente sección (2.2.5).

Interferencias de radio frecuencia e interferencias de televisión

La sexta y última manifestación relevante del efecto corona corresponde a los efectos eléctricos asociados a la interferencia radioeléctrica (RIV) y a la interferencia de televisión (TVI). Estas se originan cuando las descargas generan trenes de electrones que, al moverse bruscamente, forman corrientes de muy corta duración. Dichas corrientes transitorias producen campos eléctricos y magnéticos de alta

frecuencia que, al acoplarse a antenas cercanas, inducen pulsos responsables del ruido en receptores de radio y televisión. Las perturbaciones presentan una atenuación débil a lo largo de la línea, por lo que contribuciones originadas a decenas de kilómetros pueden superponerse en el punto de medida. Como efecto colateral, la actividad corona puede reducir sobretensiones en líneas largas en circuito abierto durante maniobras o descargas atmosféricas [1, 5].

La propagación de estas perturbaciones sigue las leyes de Maxwell; sin embargo, su predicción exacta resulta impracticable debido a la complejidad del fenómeno, en el que influyen el estado superficial del conductor, las condiciones climáticas (lluvia, humedad, neblina), la geometría de la línea y el modo de descarga. Por este motivo, el análisis y la ingeniería de RIV/TVI se basan principalmente en métodos empíricos, comparativos o semi-analíticos, así como en campañas de medición orientadas a caracterizar el espectro de frecuencias y su variación con la distancia [1, 5].

2.2.5. Factores que afectan al efecto corona

Como se indicó en el punto 2.2.2, el efecto corona corresponde a una descarga parcial que se produce cuando la intensidad del campo eléctrico supera la rigidez dieléctrica del medio aislante circundante (principalmente aire), provocando su ionización. Sin embargo, diversos factores pueden modificar tanto la forma de manifestación como las características de este fenómeno. A continuación, se describen los principales factores que afectan al efecto corona. [1, 5].

Gradiente superficial del conductor

El gradiente superficial desempeña un papel fundamental en el fenómeno de la descarga corona. Para producir la ionización del aire en un campo eléctrico uniforme, es necesario que el gradiente alcance un valor del orden de 29,8 kV/cm bajo condiciones normales de temperatura y presión (25 °C y 760 mmHg). No obstante, un gradiente de esta magnitud aplicado únicamente en la superficie del conductor no es suficiente para producir efecto corona, ya que los iones no tienen oportunidad de acumularse en cantidad suficiente para originar la descarga, a menos que el gradiente crítico se exceda hasta una distancia apreciable desde el conductor y se forme de este modo la avalancha electrónica [1, 5].

El gradiente crítico visual, también conocido como gradiente de iniciación (E_c), representa el valor mínimo necesario para alcanzar el umbral de corona en el gas que rodea a un conductor cilíndrico liso. Según el modelo de Peek, este gradiente depende de la distancia a la que se alcanza el nivel de ruptura necesario para desencadenar el proceso de descargas y las manifestaciones luminosas asociadas. La fórmula de Peek permite determinar el campo superficial crítico E_c en un conductor cilíndrico, y se expresa como [5, 15]:

$$E_c = g_0 \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{R}} \right) \quad (2.4)$$

En la ecuación (2.4), g_0 es el gradiente crítico disruptivo del aire (aproximadamente 29,8 kV/cm) y R es el radio del conductor en centímetros. Este valor teórico puede diferir del gradiente crítico efectivo o real debido a las condiciones de la superficie del conductor, tales como irregularidades geométricas, rugosidad o nivel de contaminación.

Conductor

El conductor constituye una de las variables más relevantes en el análisis del efecto corona, dado que es uno de los elementos fundamentales a considerar en el diseño de las líneas de transmisión. En este contexto, la selección adecuada del tipo de conductor y el mantenimiento de un buen estado superficial adquieren particular importancia. Sobre el conductor deben considerarse, al menos, los siguientes aspectos:

- Condición de la superficie del conductor:** tal como se mencionó en el punto anterior, los cálculos del gradiente superficial suelen realizarse asumiendo conductores cilíndricos de superficie lisa y perfectamente pulida. Sin embargo, esta idealización no refleja necesariamente el estado real del conductor, el cual puede presentar rayaduras, melladuras u otros daños en su superficie. Estas irregularidades provocan que el gradiente calculado sea inferior al gradiente efectivo, de modo que el inicio del efecto corona se produce a menores tensiones y, usualmente, en las zonas donde se concentran dichas imperfecciones [5, 15].

Para incorporar esta desviación respecto de la condición ideal, se introduce un factor de corrección m , denominado coeficiente de estado de superficie, que ajusta el gradiente crítico de inicio de corona en función del estado real del conductor. Valores típicos de m se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Valor del coeficiente de estado de superficie del conductor m para distintas condiciones [5].

Características del conductor	Valor del coeficiente m
Conductor liso ideal	1,00
Conductor cableado nuevo y limpio	0,95
Conductor cableado envejecido	0,70–0,80
Conductor tratado deficientemente	0,50–0,70
Conductor bajo lluvia, nuevo o envejecido	$\leq 0,60$

- Diámetro del conductor:** El diámetro del conductor es uno de los factores geométricos más relevantes que influyen en el inicio del efecto corona. A partir de la ecuación (2.4) se observa que, para una misma tensión aplicada y una misma disposición geométrica, un conductor de mayor radio presenta un gradiente crítico visual menor que uno de menor radio. Esto se debe a que las líneas de campo se distribuyen sobre una superficie más amplia, reduciendo el gradiente en la vecindad inmediata del conductor.

Sin embargo, como se aprecia en (2.5), el gradiente superficial E_{sup} depende directamente de la tensión V . En consecuencia, para un conductor de mayor radio se requiere una tensión más elevada para que se cumpla $E_{\text{sup}} \geq E_c$ y se inicie la corona. Por lo tanto, la tensión crítica de inicio de corona V_c es mayor para conductores de mayor diámetro que para conductores de menor diámetro [1, 2, 9].

$$E_{\text{sup}} = \frac{V}{R \cdot \ln\left(\frac{D}{R}\right)} \quad (2.5)$$

- **Longitud del conductor:** La longitud del conductor no modifica la tensión de inicio del efecto corona, ya que esta depende del gradiente de campo eléctrico local. No obstante, sí afecta la magnitud total de los efectos presentes en la línea: a mayor longitud de conductor expuesto, mayor será la sección sometida a pérdidas por corona y más amplia la zona en la que el ruido audible puede percibirse [9].
- **Cantidad de conductores:** En las líneas de transmisión es común emplear más de un conductor por fase, disponiéndolos en haz (*bundling*). Esta configuración reduce la intensidad del campo eléctrico en la superficie de cada subconductor y, en consecuencia, disminuye la incidencia del efecto corona y sus efectos asociados [16].
- **Material del conductor:** El material constitutivo del conductor también influye en el efecto corona, ya que afecta el valor de la movilidad iónica en torno al conductor [15].

Tabla 2.2: Movilidad iónica según material [15].

Material	Tensión positiva [$\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$]	Tensión negativa [$\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$]
Cobre	$8 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Aluminio	$7,4 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Acero	$12 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$

Como se observa en la Tabla 2.2, el acero presenta una movilidad iónica mayor que el cobre y el aluminio, por lo que un conductor fabricado con este material será más propenso al efecto corona que uno de aluminio o de cobre.

- **Temperatura del conductor:** El calentamiento por carga modifica el entorno inmediato del conductor, elevando la temperatura tanto del metal como del aire adyacente. Esto reduce la densidad relativa del aire y, en consecuencia, el gradiente de inicio de la descarga, lo que tiende a disminuir la intensidad del efecto corona. Estudios realizados en líneas reales (Chartier, 1993) muestran una reducción de los efectos de corona atribuible al calentamiento del conductor [2].

- **Estado del conductor:** Un conductor nuevo presenta, en general, una superficie metálica pulida y típicamente hidrofóbica, de modo que el agua se distribuye en numerosas gotas alrededor de toda la periferia. Con el envejecimiento (corrosión, oxidación y formación de productos de reacción con el ambiente y con la propia corona), se desarrolla una capa de compuestos que vuelve la superficie hidrofílica. En estas condiciones, el agua tiende a extenderse o concentrarse en la parte inferior del conductor, en lugar de distribuirse uniformemente en todo el contorno.

Como resultado, en un conductor nuevo se forman muchas más gotas activas repartidas por la superficie, es decir, un mayor número de fuentes de corona. En cambio, en un conductor envejecido el número de puntos activos se reduce, disminuyendo así los niveles de CL, RIV y AN.

El envejecimiento de un conductor puede producirse de forma natural, en función del tiempo y de las condiciones ambientales a las que ha estado expuesto, o bien de forma artificial, mediante técnicas como el arenado o el recubrimiento del conductor con una cinta de algodón o de acero inoxidable muy delgada [2, 17].

Densidad relativa del aire

Como se indicó al presentar la relación de Peek, esta es válida para condiciones normales de laboratorio. Por lo tanto, si la densidad del aire varía debido a cambios en la temperatura o en la presión, la rigidez dieléctrica del aire se ve afectada y, en consecuencia, también el gradiente crítico [5].

Dentro del rango de presiones usualmente encontrado, la densidad del aire aumenta con la presión y disminuye con la temperatura. La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) propone la siguiente expresión para la densidad relativa del aire δ (2.6) [5]:

$$\delta = \frac{0,393 \cdot P}{273 + T} \quad (2.6)$$

donde:

- P : presión del aire en mmHg.
- T : temperatura del aire en °C.

El factor de corrección por densidad del aire se toma, en general, como δ^k , donde el valor del exponente k varía entre 0,5 y 1 [5].

Finalmente, el gradiente crítico E_c , en kV/cm (valor *peak*), se expresa como (2.7):

$$E_c = g_0 \cdot \delta \cdot m \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot R}} \right) \quad (2.7)$$

Efecto de la arena en el conductor

En presencia de partículas de arena sobre la superficie del conductor, las pérdidas por efecto corona pueden volverse relativamente elevadas, debido a la deformación del campo eléctrico asociada al aumento de su intensidad en la vecindad de cada partícula [6].

Efecto del clima en el conductor

Las condiciones climáticas a las que se ve expuesto el conductor son variables y cambiantes, por lo que cada régimen ambiental puede modificar la forma en que el efecto corona se manifiesta e impacta sobre la línea. Entre las situaciones más relevantes se tiene [9]:

- **Clima seco / buen tiempo:** las pérdidas dependen principalmente del estado de la superficie del conductor, el cual se relaciona con los detalles de construcción y con la presencia de defectos (muescas, rayaduras) y de sustancias orgánicas e inorgánicas transportadas por el aire (grasa, contaminación, insectos, polvo), así como con el nivel de envejecimiento del conductor.
- **Clima húmedo:** los cambios en la humedad del aire provocan una variación en el área de la corona, que se vuelve más intensa y menos homogénea a medida que se amplía la región afectada.
- **Clima lluvioso:** el agua, en forma de lluvia o llovizna, es capaz de formar en poco tiempo una película alrededor del conductor. Sin embargo, debido a la acción de la gravedad, en la parte inferior del conductor se acumulan gotas de agua que actúan como discontinuidades en la superficie, originando nuevas fuentes de corona. El agua reduce los niveles de gradiente crítico, lo que incrementa las pérdidas por corona y eleva los niveles de interferencia. La corrección de estas variaciones se introduce mediante el coeficiente de superficie m .

2.3. Jaula corona

En esta memoria, la jaula corona constituye el medio experimental principal para la realización de las mediciones sobre los conductores. Antes de describir el montaje específico, es necesario revisar su principio de funcionamiento y las condiciones de prueba asociadas.

2.3.1. Principio de funcionamiento

La jaula corona opera bajo el principio de generar un campo eléctrico controlado entre el conductor y una superficie conductora de referencia, replicando de forma escalada y segura las condiciones presentes en las líneas aéreas de alta tensión.

Existen dos configuraciones principales en el diseño de jaulas corona: una con sección transversal cuadrada y otra con sección transversal cilíndrica. En esta memoria se emplea la configuración cilíndrica, que consiste en un conductor cilíndrico suspendido concéntricamente dentro de un cilindro metálico (la jaula), formando un condensador coaxial. Esta geometría asegura una distribución radial del campo eléctrico, cuya intensidad depende exclusivamente de la tensión aplicada y de las dimensiones del sistema [4].

La precisión del sistema reside en su capacidad para generar un campo eléctrico altamente homogéneo y simétrico alrededor del conductor, minimizando los efectos de borde y las perturbaciones externas [4].

2.3.2. Condiciones de prueba y medición con la jaula corona

La validez de los resultados experimentales obtenidos en una jaula corona depende directamente de las condiciones en que se realizan las pruebas. Estas deben controlarse rigurosamente para garantizar la reproducibilidad, exactitud y representatividad del fenómeno. Las variables clave incluyen el tipo de tensión aplicada, las condiciones ambientales, el estado del conductor, la instrumentación de medición y los criterios adoptados para detectar el inicio de la descarga [4].

Desde el punto de vista eléctrico, el sistema requiere una fuente de alta tensión que sea capaz de suministrar niveles adecuados de tensión alterna o continua, según el tipo de estudio. En el presente trabajo se emplea tensión alterna (AC), por lo que el campo eléctrico y la ionización se repiten cíclicamente, lo que exige observar el fenómeno a lo largo de cada ciclo [4].

Las condiciones atmosféricas influyen de manera directa en la formación del efecto corona. Parámetros como la temperatura, la presión y la humedad relativa modifican el gradiente superficial crítico necesario para ionizar el aire. Para un control estricto, estas variables se miden en cada ensayo y se corrige la tensión de inicio mediante el factor de densidad relativa del aire (δ), lo que permite normalizar los resultados a condiciones de referencia y compararlos con modelos teóricos u otros experimentos [4].

En cuanto a la instrumentación, un parámetro esencial es la corriente de corona, que se mide conectando la jaula a tierra mediante un amperímetro de alta sensibilidad o una resistencia *shunt*, registrando así la corriente de fuga debida a la ionización. Además, se emplean sensores de campo eléctrico, cámaras UV y sonómetros para captar los efectos luminosos y acústicos asociados al inicio de la descarga [4].

Para garantizar que la descarga corona se produzca exclusivamente en la región de interés (el conductor cilíndrico central), es fundamental mantener la coaxialidad entre el conductor y la jaula, así como minimizar las inhomogeneidades externas al conductor. Esto se logra mediante el uso de aisladores que centran y soportan mecánicamente el conductor dentro de la jaula [4].

Capítulo 3

Metodología experimental

Como se expuso en el capítulo anterior, la jaula corona constituye el equipo principal utilizado para la realización de las mediciones de corriente asociadas al efecto corona, mientras que el ruido audible generado por el fenómeno se registra mediante un sonómetro de precisión.

En este capítulo se describe la metodología experimental aplicada, detallando la configuración del montaje de medición, las modificaciones introducidas en el sistema y el procedimiento seguido para la adquisición de los datos.

3.1. Montaje experimental

El montaje experimental corresponde a la configuración de la jaula corona que se utilizará en el desarrollo de esta memoria para la realización de las mediciones.

3.1.1. Montaje inicial

El montaje de medición utilizado corresponde al descrito en [4], donde se presenta la jaula corona apoyada sobre dos estructuras de madera y una estructura metálica en la cual se fija el conductor a ensayar. Este conductor es sostenido por un perno situado a un tubo metálico que, a su vez, está rodeado por un anillo corona. En uno de sus extremos se dispone un acollador de acero y, en ambos lados, dos aisladores anclados a la estructura metálica, capaces de soportar una tensión de 120 kV.

Entre el anillo corona anclado al tubo metálico se ubican dos anillos corona adicionales, contruidos con tubo corrugado. En uno de los extremos, conectado mediante un conductor de cobre recubierto con tubo corrugado de aluminio, se encuentra el elevador de tensión; en el otro extremo, también a través de un conductor de cobre recubierto con tubo corrugado de aluminio, se conecta el divisor capacitivo. En la figura 3.1 se muestra el montaje inicial empleado en las pruebas.



Figura 3.1: Modelo experimental utilizado para la realización de mediciones [4].

3.1.2. Montaje actualizado

En [4] se indica, como trabajo futuro, la necesidad de “proponer mejoras en 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”. Si bien esta memoria no tiene por objetivo rediseñar la jaula corona, sí busca reducir al mínimo el efecto corona adicional generado por elementos del montaje. Por este motivo, se introdujeron una serie de modificaciones al montaje original.

La figura 3.2 ilustra las mejoras implementadas, las cuales se detallan a continuación:

1. **Reubicación del acollador:** se desplazó el acollador de acero hacia una posición previa al aislador. Este elemento era uno de los que más contribuía al efecto corona adicional, tanto en forma de señal eléctrica como de ruido audible. Al reubicarlo en una zona no energizada, se lo excluye efectivamente del circuito de alta tensión.
2. **Ampliación del tubo de sujeción del conductor:** se aumentó el diámetro del tubo que sostiene el conductor, ya que uno de los conductores ensayados no era compatible con el diseño original. Esta modificación permite incorporar conductores de mayor sección transversal sin alterar significativamente la geometría global del campo eléctrico.
3. **Incorporación de codos de PVC recubiertos con aluminio:** en las uniones de los tubos corrugados se instalaron codos de PVC forrados con aluminio. A diferencia del montaje original, donde las

3.2. Elección de conductores y recubrimientos

Para realizar las mediciones fue necesario, en primer lugar, seleccionar los conductores y los recubrimientos que se someterían a prueba. Los conductores utilizados se presentan en la tabla 3.1 y los recubrimientos considerados se resumen en la tabla 3.2.

Tabla 3.1: Características de los conductores eléctricos seleccionados.

Código	Material	Sección nominal (mm ²)	Diámetro ext. nominal (mm)	N° de hilos	Peso (kg/km)	Resistencia máx. (Ω/km)
Cairo	Aluminio	235,8	19,88	19	645,7	0,142
Cobre	Cobre	253	20,6	37	2270	0,074
Flint	Aluminio (AAAC)	375,4	25,2	37	1035	0,08944
Coreopsis	Aleación de Al (AAC)	805,7	36,91	61	2223	0,035
Alliance	Aluminio (AAAC)	125,1	14,3	7	345	0,2658

Tabla 3.2: Condiciones superficiales del conductor a ensayar.

Condiciones superficiales	
1	Conductor limpio
2	Agua de la llave
3	Agua de lluvia
4	Agua con severidad de polución media
5	Arena
6	Cinta aislante
7	Aceite

Los conductores de prueba fueron obtenidos para el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Técnica Federico Santa María por el profesor Raúl Rendic, con la colaboración del Sr. Galvarino Herrera de la empresa Bimex.

Por otra parte, los recubrimientos se seleccionaron en función de la literatura técnica. Varios de ellos se vinculan directamente con los factores descritos en la sección “Factores que afectan al efecto corona” (2.2.5), en particular con las condiciones superficiales del conductor. Para estas pruebas se utilizó como referencia el conductor Cairo, de 19,88 mm de diámetro.

En relación con los recubrimientos asociados al agua, se consideraron distintos escenarios: el efecto de la lluvia y del agua en general, y el impacto de la polución disuelta. La proporción entre agua y sal para simular una severidad de polución media se obtuvo de la *IEC/TS 608015-1* [18], donde se establece un rango entre 14 g y 40 g de sal por litro de agua. En este trabajo se adoptó un valor intermedio de 32 g de sal por litro. El agua de la llave se obtuvo directamente de la red del laboratorio, mientras que el agua de lluvia fue recolectada el 21 de agosto de 2025.

La arena se obtuvo en la playa de Viña del Mar el 29 de septiembre de 2025 y posteriormente fue secada en el laboratorio de Química en una “Estufa Universal Basic EXT Forzada Memmert UFB 400”, con el fin de garantizar condiciones reproducibles en las pruebas. La cinta aislante se incorporó como un recubrimiento sintético para evaluar el comportamiento de un conductor cubierto de forma continua. Finalmente, el uso de aceite se basó en la propuesta de [19], donde se emplea aceite para extinguir las descargas por corona; en esta memoria se busca comprobar experimentalmente si el aceite, utilizado como recubrimiento superficial, produce efectos similares de mitigación del fenómeno.

3.3. Protocolo de medición

Previo al inicio de las mediciones, es necesario armar el montaje mostrado en la figura 3.2 desde cero, es decir, con la jaula ensamblada según lo descrito en [4] y sin ningún componente externo conectado. El proceso de conexión y preparación del sistema toma aproximadamente 3 horas, tras lo cual se ejecuta el siguiente protocolo de inicio de mediciones:

1. Verificar que cada parte del sistema esté correctamente aterrizada, es decir, los anillos exteriores de la jaula, la estructura metálica que sostiene el conductor, el elevador de tensión, el divisor capacitivo y, finalmente, la jaula que separa el laboratorio de Alta Tensión.
2. Verificar la resistencia instalada dentro del portashunt y comprobar que las puntas de tensión, tanto desde el portashunt al osciloscopio (x10) como desde el divisor capacitivo al osciloscopio (x100), estén correctamente configuradas.
3. Instalar el conductor en su posición y, a continuación, aplicar el recubrimiento correspondiente (solo cuando sea necesario).
4. Encender el tablero de alimentación, que está conectado al *variac*, el cual, a su vez, se encuentra conectado al transformador elevador de tensión.
5. Retirar la pértiga del conductor para habilitar la energización del sistema.
6. Encender el *variac* y elevar la tensión gradualmente hasta el nivel de prueba deseado (50, 60, 70, 80, 90 o 100 kV).
7. Realizar las mediciones correspondientes.
8. Reducir la tensión del *variac* hasta cero y apagarlo.
9. Volver a colocar la pértiga en el conductor.
10. Aplicar nuevamente el recubrimiento (en caso de que sea necesario).
11. Repetir el procedimiento a partir del quinto punto.

Tal como se indica en los puntos tercero y décimo, la ejecución de estos pasos depende de la necesidad de modificar o aplicar nuevamente la condición superficial del conductor (recubrimiento). Cuando las mediciones se realizan sin alterar dicha condición, o cuando no es necesario renovarla, estos pasos se omiten.

Los recubrimientos que requieren aplicación periódica son los asociados al uso de agua y de aceite. En el caso del agua, la aplicación se realiza aproximadamente cada 7–8 mediciones, de acuerdo con un criterio empírico basado en la observación de que, al energizar el conductor, la cantidad de gotas presentes sobre su superficie disminuye de forma apreciable, debido al movimiento del conductor. En el caso del aceite, la aplicación se efectúa cada 30 mediciones, con el propósito de mantener una película continua sobre el conductor al inicio de cada cambio de tensión. Este criterio busca asegurar que las mediciones correspondientes a un diferentes nivel de tensión se inicien bajo condiciones superficiales lo más similares posible, reduciendo así la variabilidad asociada al recubrimiento.

Por el contrario, la arena permanece adherida al conductor durante toda la serie de ensayos, al igual que la cinta aislante.

3.3.1. Medición de corriente de corona

Considerando que el osciloscopio mide únicamente valores de tensión, se hace necesario el uso de una resistencia *shunt* para obtener la corriente de corona a partir de la Ley de Ohm. El valor de la resistencia utilizada se seleccionó en función de la corriente pre-corona reportada en [4]. Tal como allí se explica, el valor más adecuado para la resistencia *shunt* es 100 k Ω , ya que permite obtener niveles de tensión medibles en el osciloscopio y simplifica el cálculo de los valores finales de corriente.

No obstante, al tratarse de una resistencia de valor elevado, resulta necesario evaluar la influencia de la capacitancia parásita asociada al módulo de conexión (denominado localmente *Porta Shunt*), ya que ambos elementos conforman una red RC paralela susceptible de introducir un desfase entre la tensión medida y la corriente de corona real. Mediante un medidor RLC, se determinó que la capacitancia equivalente respecto a tierra de dicho módulo es $C = 25,7$ pF. A la frecuencia industrial de 50 Hz, la impedancia capacitiva asociada es del orden de $|Z_C| \approx 10^8 \Omega$, magnitud que supera ampliamente el valor de la resistencia *shunt*. Bajo estas condiciones, la corriente circula casi en su totalidad por la rama resistiva, dado que la rama capacitiva presenta una impedancia prácticamente infinita para efectos del análisis. El desfase teórico calculado es $\varphi \approx \arctan(\omega RC) \approx 0,0008 \text{ rad} \approx 0,05^\circ$, una desviación despreciable. En consecuencia, se asume que la tensión registrada en el osciloscopio se encuentra en fase con la corriente de corona, descartándose la necesidad de correcciones adicionales.

Con base en el séptimo punto del protocolo de medición, el procedimiento para las mediciones de corriente de corona es el siguiente:

1. Ajustar la escala del osciloscopio en tiempo/división (2 o 5 $\mu\text{s}/\text{div}$) y en tensión/división (2, 5, 10 o 20 V/div), seleccionando estos valores según el conductor o recubrimiento bajo prueba.
2. Registrar las condiciones iniciales de temperatura, presión y porcentaje de humedad relativa.

3. Aumentar gradualmente la tensión hasta alcanzar un nivel en el que los pulsos de corriente observados en el conductor sean estables y repetitivos (50, 60, 70, 80, 90 o 100 kV), valor que puede variar según el conductor o recubrimiento ensayado.
4. Mediante el botón *Single* del osciloscopio, capturar un pulso aleatorio de corriente de fuga de corona.
5. Una vez que el pulso se encuentra congelado en pantalla, guardar el registro en un *pendrive* hasta completar el número de pulsos requeridos (aproximadamente 30 pulsos).
6. Registrar las condiciones finales de temperatura, presión y porcentaje de humedad relativa.
7. Transferir los datos almacenados en el *pendrive* al computador y repetir el procedimiento para la siguiente tensión de prueba o para el siguiente conductor.

3.3.2. Medición de ruido audible

Para las mediciones de ruido audible se utiliza un sonómetro (figura 3.3), el cual entrega el nivel sonoro ponderado en dBA.

De acuerdo con el séptimo punto del protocolo general de medición, para obtener las mediciones de ruido se sigue el siguiente procedimiento:

■ Configuración y verificación del sonómetro (etapa previa):

1. Ensamblar el sistema de medición, orientando el micrófono del sonómetro en dirección a la jaula corona (figura 3.4) y conectándolo mediante un cable al equipo de registro ubicado junto al operador.
2. Calibrar el sonómetro utilizando el equipo de calibración correspondiente (figura 3.5), siguiendo las instrucciones del fabricante.
3. Configurar el sonómetro según los parámetros indicados en el listado de ajustes presentado más adelante.
4. Medir y registrar el nivel de ruido ambiente antes de energizar el sistema, a fin de contar con un valor de referencia.

■ Procedimiento de medición:

1. Una vez que el conductor ha sido energizado y alcanza la tensión de ensayo deseada, observar el nivel de ruido indicado por el sonómetro.
2. Cuando la lectura se estabilice, registrar el valor de nivel sonoro correspondiente.

3. Repetir el procedimiento de medición para los siguientes niveles de tensión, conductores o recubrimientos bajo prueba, siguiendo el protocolo establecido en la sección anterior.



Figura 3.3: Sonómetro (elaboración propia).



Figura 3.4: Micrófono conectado al sonómetro (elaboración propia).



Figura 3.5: Equipo de calibración del sonómetro (elaboración propia).

Para el ajuste del sonómetro se siguieron los parámetros indicados en la figura 3.3, configurando el equipo de la siguiente forma:

- *Detector* → *RMS*
- *Time weighting* → *Slow*
- *Display* → *SPL*
- *Sound incidence* → *Frontal*
- *Ext. filter* → *Out*
- *Ref / Test / Operate* → *Operate*
- *FSD* → 90 (110), ajustable según el nivel sonoro observado.
- *All / Max/Min* → *RMS*
- *Freq. weighting* → *A*

Finalmente, una vez completado el proceso de adquisición de datos de ruido audible, se procede al posprocesamiento y análisis de las mediciones, los cuales se describen en el capítulo siguiente de la memoria.

Capítulo 4

Modelo de análisis

En el presente capítulo se describe la metodología de análisis que se aplicará a los resultados obtenidos en las mediciones de corriente de corona y ruido audible, con el fin de caracterizar cuantitativamente el efecto corona bajo las distintas configuraciones de conductores y condiciones superficiales ensayadas.

4.1. Corriente corona

4.1.1. Análisis de la corriente de corona

El análisis de la corriente de corona, medida a través de una resistencia *shunt* conectada a la jaula corona tal como se describe en el capítulo 3, se centrará en la cuantificación de los valores máximos de corriente (*peak* de los impulsos). Estos valores se compararán entre los distintos conductores y sus condiciones superficiales, con el fin de contrastar los resultados con los siguientes supuestos basados en la literatura:

1. A una misma tensión aplicada, un conductor de menor diámetro presenta mayores niveles de corriente de corona que uno de mayor diámetro.
2. A igualdad de condiciones geométricas y eléctricas, un conductor en peor estado superficial (alto grado de envejecimiento o daño) presenta corrientes de corona más elevadas.
3. Para conductores de espesor similar, los conductores de aluminio generan menores corrientes de corona que los conductores de cobre.
4. La presencia de agua sobre la superficie del conductor modifica el gradiente superficial y aumenta la intensidad del efecto corona, lo que se traduce en un mayor valor de la corriente de corona en comparación con el conductor sin recubrimiento.
5. La presencia de arena sobre el conductor también altera el gradiente superficial, incrementando la intensidad del efecto corona, provocando así un mayor valor de la corriente de corona respecto del conductor sin recubrimiento.

6. Tomando como única base el estudio presentado en [19], se espera que la presencia de aceite disminuya la corriente de corona. A diferencia de la referencia citada, donde el aceite es liberado por un mecanismo específico sobre un área limitada, esta memoria asume que el principio de supresión se mantendrá al aplicar el aceite como un recubrimiento continuo sobre todo el conductor.
7. Tomando como referencia la metodología de [20] sobre conductores cubiertos con película dieléctrica, se proyecta que el uso de cinta aislante disminuirá la corriente corona. Se asume que la cinta generará un efecto de apantallamiento dieléctrico análogo al reportado en la literatura, limitando el desarrollo de las avalanchas electrónicas causantes de la corriente corona.

El objetivo es, a partir de supuestos fundamentados en la literatura, identificar para cada nivel de tensión qué tipo de conductor y qué condición superficial presentan los menores valores de *peak* de corriente, con el fin de determinar la configuración que exhibe el menor efecto corona.

4.1.2. Análisis cromático

Una de las técnicas empleadas para analizar la corriente de corona es el análisis cromático, cuyo fundamento teórico se basa en la representación de cada señal mediante tres magnitudes derivadas de su forma de onda $i(t)$ y de su transformada de Fourier $F(\omega)$ [21]:

$$E_b = \int |i(t)|^2 dt \quad (4.1)$$

$$\omega_c = \frac{1}{2\pi E_b} \int \omega |F(\omega)|^2 d\omega \quad (4.2)$$

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} \quad (4.3)$$

$$B = \frac{1}{E_b} \int (\omega - \omega_c)^2 |F(\omega)|^2 \frac{d\omega}{2\pi} \quad (4.4)$$

donde:

- $E_b \rightarrow$ representa la energía total de la señal.
- $f_c \rightarrow$ representa la frecuencia central, es decir, la frecuencia en torno a la cual se concentra la mayor parte de la energía espectral.
- $B \rightarrow$ representa el ancho de banda efectivo, asociado a la dispersión espectral de la energía alrededor de f_c .

El conjunto (E_b, f_c, B) constituye la coordenada cromática de la señal, la cual puede visualizarse en un espacio tridimensional, asignando cada magnitud a uno de los ejes (por ejemplo, $Z = B$, $X = E_b$ y

$Y = f_c$).

En términos físicos, y siguiendo [21]:

- E_b cuantifica la energía total de la descarga; valores elevados indican descargas más intensas.
- f_c indica la región del espectro de frecuencias donde se concentra la mayor parte de la energía: para valores altos de f_c , la energía se desplaza hacia frecuencias más altas, mientras que para valores bajos se concentra en frecuencias más bajas.
- B mide la dispersión de la energía en frecuencia en torno a f_c : valores altos de B corresponden a señales con un espectro más extendido (mayor cantidad de componentes de frecuencia), mientras que valores bajos indican que la energía se concentra en un rango de frecuencias más estrecho.

Las señales analizadas tienden a agruparse formando *clusters* en el espacio cromático, de modo que señales con características similares se concentran en regiones próximas, mientras que señales de distinta naturaleza se ubican en regiones claramente separadas [21].

El procesamiento de datos utilizado en esta memoria para la corriente de corona se basa en un código que toma los registros de cada medición, identifica las columnas de tiempo y de señal para reconstruir la forma de onda $i(t)$. A partir de esta señal se calcula su envolvente y se realiza la detección del pulso de corona. Luego, empleando el modelo cromático, se obtienen los valores de E_b , f_c y B para cada medición individual.

Con estos resultados se generan gráficos tridimensionales por tensión, por conductor y por condición superficial. Antes de la generación de las figuras, los datos cromáticos se someten a un filtro que elimina los puntos más alejados de cada *cluster*, con el fin de depurar valores atípicos y obtener representaciones más robustas del comportamiento global.

Este análisis permitirá examinar el comportamiento de los *clusters* correspondientes a los distintos conductores y recubrimientos bajo las diferentes tensiones aplicadas. Se evaluará la variación conjunta de las magnitudes cromáticas E_b , f_c y B , identificando tendencias y desplazamientos característicos de los *clusters*, buscando establecer los límites operativos asociados a la corriente de corona.

4.2. Ruido audible de corona

El análisis del ruido audible de corona se centrará en la comparación de los niveles sonoros registrados entre los distintos conductores y las diferentes condiciones superficiales bajo prueba. Esta comparación se realizará considerando los mismos supuestos basados en la literatura establecidos previamente en la sección de corriente, pero adaptados al contexto del ruido audible:

1. A una misma tensión aplicada, un conductor de menor diámetro genera mayores niveles de ruido audible que uno de mayor diámetro.

2. A igualdad de condiciones geométricas y eléctricas, un conductor en peor estado superficial (alto grado de envejecimiento o daño) genera más ruido audible.
3. Para conductores de espesor similar, los conductores de aluminio producen menores niveles de ruido audible que los conductores de cobre.
4. La presencia de agua sobre la superficie del conductor modifica el gradiente superficial y aumenta la intensidad del efecto corona, lo que se traduce en mayores niveles de ruido audible en comparación con el conductor sin recubrimiento.
5. La presencia de arena sobre el conductor también altera el gradiente superficial, incrementando la intensidad del efecto corona, provocando así un mayor ruido audible respecto del conductor sin recubrimiento.
6. Tomando como única base el estudio presentado en [19], se espera que la presencia de aceite disminuya el ruido de corona. A diferencia de la referencia citada, donde el aceite es liberado por un mecanismo específico sobre un área limitada, esta memoria asume que el principio de supresión se mantendrá al aplicar el aceite como un recubrimiento continuo sobre todo el conductor.
7. Tomando como referencia la metodología de [20] sobre conductores cubiertos con película dieléctrica, se proyecta que el uso de cinta aislante disminuirá el ruido audible. Se asume que la cinta generará un efecto de apantallamiento dieléctrico análogo al reportado en la literatura, limitando el desarrollo de las avalanchas electrónicas causantes del ruido.

El objetivo principal es identificar, para cada nivel de tensión de prueba aplicado, qué conductor y condición superficial genera los valores máximos y mínimos de ruido audible. A partir de estos resultados, se determinará cuál de los conductores presenta el menor efecto corona en términos de emisión sonora, considerando que un menor nivel de ruido audible se asocia directamente a una menor actividad de corona en la superficie del conductor.

4.3. Corriente *peak* con ruido audible

Ya se analizó por separado el comportamiento de la corriente y el ruido bajo supuestos razonables vía la literatura técnica; ahora, esta sección se enfoca en integrar ambos parámetros para determinar si existe una correlación directa entre la intensidad eléctrica de las descargas y la presión sonora emitida. El propósito es validar si el incremento de la corriente i_{peak} se traduce invariablemente en una elevación proporcional del ruido audible (RA), permitiendo identificar si las variables de estado superficial y geometría afectan de igual manera a ambas señales. Este análisis es fundamental para dejar de estudiar los datos por separado y entender cómo se conectan entre sí. El objetivo es comprobar si la corriente eléctrica realmente sirve como un indicador directo para saber cuánto ruido se generará, verificando si en todos los casos probados ambos fenómenos crecen de la misma manera.

Capítulo 5

Resultados y análisis

5.1. Preámbulo

En este capítulo se presentan los resultados y análisis de la corriente de corona y del ruido audible obtenidos a partir de los procesos de medición descritos en el capítulo 3. Posteriormente, se aplican los modelos de análisis establecidos en el capítulo 4, con el propósito de comparar la corriente de corona y el ruido audible entre las distintas configuraciones de conductores y condiciones superficiales.

Los análisis se organizan en dos grupos: el primero corresponde a los diferentes conductores, y el segundo, a los distintos recubrimientos aplicados sobre el conductor de referencia, empleando en cada caso los criterios definidos en el capítulo 4.

En la sección 3.3.1 se establecen como condiciones iniciales y finales la temperatura, presión y humedad relativa, parámetros que influyen en el fenómeno corona (véase la sección 2.2.5). Para el análisis global de esta memoria, dichos parámetros se tratarán como constantes. La temperatura ambiente y la humedad relativa fueron medidas mediante el equipo disponible en la Universidad, mientras que la presión atmosférica se obtuvo a partir de datos meteorológicos históricos cercanos a Valparaíso, extraídos mediante la *Open-Meteo Archive API* [22]. En el período considerado, la presión atmosférica media diaria fue de aproximadamente $763 \text{ mmHg} \pm 2 \text{ mmHg}$, la humedad relativa promedio fue de $54 \% \pm 4 \%$ y la temperatura ambiente fue de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Bajo estas condiciones, la influencia de las variaciones del factor de densidad del aire δ , definido según la IEC (ecuación (2.6)), se considera despreciable para el análisis global. En efecto, para variaciones pequeñas de presión y temperatura, el cambio relativo de δ puede aproximarse en primer orden mediante (5.1).

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} \approx \frac{\Delta P}{P} \cdot \frac{\Delta T}{273 + T}. \quad (5.1)$$

Así, a $T \approx 20^\circ\text{C}$, un incremento de 1°C produce una variación relativa de δ del orden de $0,34 \%$,

mientras que un aumento de 1 mmHg en P produce una variación relativa de aproximadamente 0,13 %. Considerando la estabilidad de la presión con la temperatura y la exclusión de la humedad en el modelo, se despreciarán las variaciones de estos parámetros, asumiéndolos constantes de aquí en adelante.

5.2. Corriente de corona

Durante las mediciones de corriente se identificaron dos tipos principales de pulsos. La figura 5.1, correspondiente al conductor Cairo sin recubrimiento, muestra un pulso de mayor duración (pulso “lento”), cuyo decaimiento completo ocurre aproximadamente a los $55,5 \mu s$. Por otro lado, la figura 5.2 presenta un pulso de menor duración (pulso “rápido”), que demora cerca de $22,9 \mu s$ en decaer totalmente.

Entre los conductores y recubrimientos ensayados, las formas de onda de tipo lento se observaron para Cairo en estado normal, Cobre y Flint, mientras que el resto de las configuraciones (conductores y recubrimientos) se caracterizan tener forma de onda del tipo rápida.

Las figuras 5.1 y 5.2 ilustran ejemplos de pulsos de corriente corona registrados para los conductores Cairo y Alliance a 100 kV. En ellas se evidencia el posprocesamiento digital de la señal: sobre la forma de onda completa (en azul), se destaca en color naranja el segmento del pulso extraído para el análisis, el cual queda delimitado temporalmente por los marcadores verticales de inicio (verde) y fin (rojo).

El segmento de señal seleccionado se recorta a una duración fija de $12 \mu s$, contados a partir de la detección del frente de pulso. Esta normalización temporal busca optimizar la aplicación del modelo cromático, asegurando que todas las muestras posean la misma longitud y que el cálculo de las magnitudes se realice con base en señales de idéntica duración.

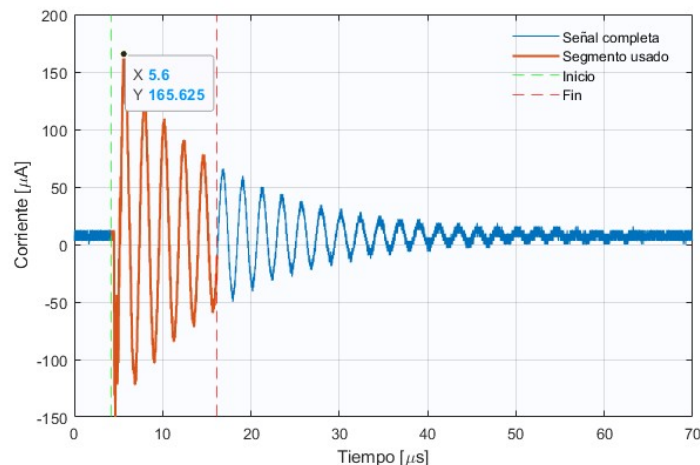


Figura 5.1: Forma de onda de corriente para el conductor Cairo (19,88 mm) a 100 kV, (Elaboración propia).

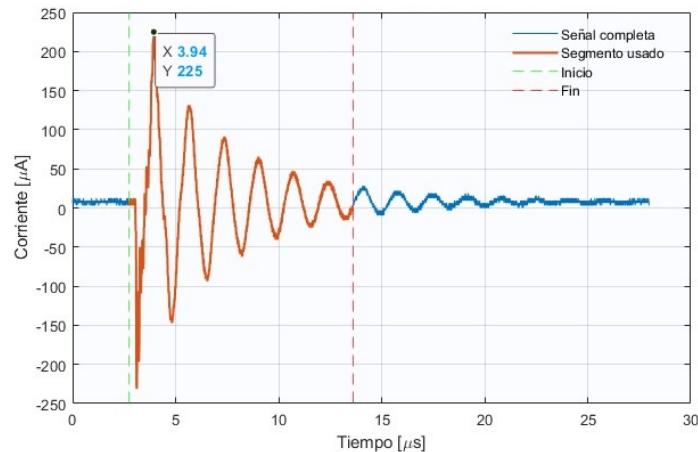


Figura 5.2: Forma de onda de corriente para el conductor Alliance (14,33 mm) a 100 kV, (Elaboración propia).

Como ya se mencionó hay conductores que presentan pulsos lentos y otros pulsos rápidos, mientras que todos los recubrimientos presentan estos pulsos rápidos. Este comportamiento puede asociarse tanto al estado superficial de los conductores (daño o envejecimiento) como a la presencia de recubrimientos, constituyendo uno de los efectos más notorios al introducir defectos o recubrimientos en el sistema.

Por otra parte, se observa que los pulsos presentan polaridad negativa y un periodo del orden de los microsegundos. Estas características son consistentes con la generación de pulsos de Trichel, típicos de la descarga corona en configuraciones donde el conductor se mantiene a potencial negativo respecto de tierra.

5.2.1. Análisis a partir de *peak* de corriente

Como se explica en el capítulo 4.1.1, el objetivo es, a partir de supuestos fundamentados en la literatura, identificar para cada nivel de tensión qué tipo de conductor y qué condición superficial presentan los menores valores *peak* de corriente, con el fin de determinar la configuración que exhibe el menor efecto corona.

Las figuras 5.3 y 5.4 presentan, para cada grupo de conductor y condición superficial, los valores estadísticos del *peak* de corriente. En particular, el análisis se basará en la mediana de $I_{\text{TpK_med}}$, calculada a partir de 30 mediciones por caso, por considerarse una medida robusta y representativa frente a la presencia de valores extremos propios del fenómeno corona.

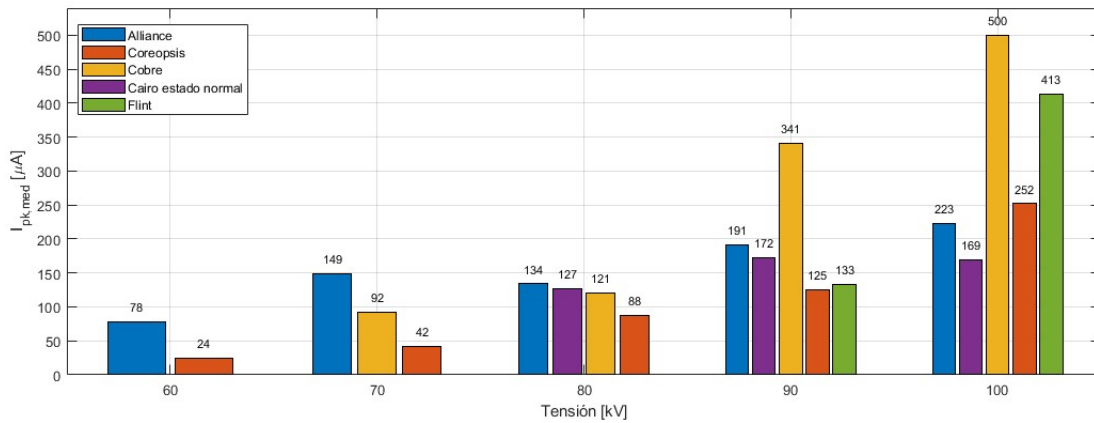


Figura 5.3: Representación de los diferentes valores de corriente *peak* en diferentes topologías de conductores, (Elaboración propia).

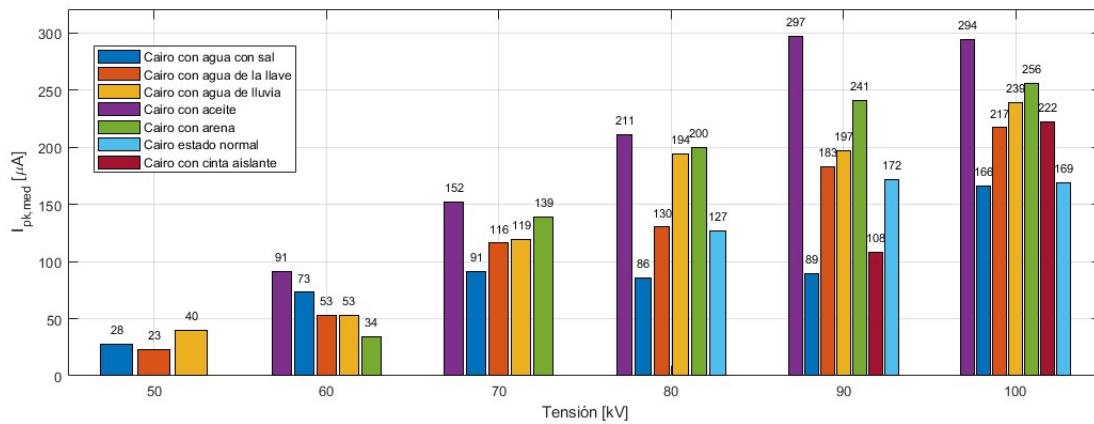


Figura 5.4: Representación de los diferentes valores de corriente *peak* para diferentes condiciones superficiales en el conductor, (Elaboración propia).

El análisis de la corriente de corona se realizará con base en el Capítulo 4.1.1, utilizando los valores *peak* observados en las figuras 5.3 y 5.4.

Comportamiento de las diferentes topologías de conductores:

- **60 kV:** La corriente *peak* valida la influencia de la geometría: el conductor de menor diámetro (Alliance) registra el máximo de $78 \mu A$, frente al mínimo de $24 \mu A$ del conductor de mayor grosor (Coreopsis), confirmando la relación inversa entre el calibre y la intensidad de la descarga.
- **70 kV:** Se incorpora el conductor de Cobre, registrando una corriente *peak* de $92 \mu A$. Este valor representa un punto intermedio entre el conductor Alliance ($149 \mu A$) y el Coreopsis ($42 \mu A$), lo cual es consistente con su diámetro (20,6 mm), también situado entre ambos extremos. Esto ratifica

que la magnitud de la descarga sigue estando gobernada principalmente por la sección transversal del conductor.

- **80 kV:** La tendencia general ratifica que la corriente *peak* disminuye conforme aumenta el diámetro del conductor. El conductor Coreopsis (mayor diámetro) mantiene el registro más bajo con $88 \mu A$, mientras que el Alliance (menor diámetro) alcanza los $134 \mu A$. Asimismo, los valores similares entre Cairo y Cobre ($127 \mu A$ y $121 \mu A$) confirman que la respuesta del sistema está gobernada por las dimensiones físicas y no por el tipo de material para esta tensión.
- **90 kV:** Se incorpora el conductor Flint ($133 \mu A$), cuyo comportamiento se ajusta a la tendencia geométrica esperada, situándose entre el Cairo ($172 \mu A$) y el Coreopsis ($125 \mu A$). Sin embargo, se produce un quiebre notable con el conductor de Cobre: a pesar de tener un diámetro intermedio, dispara su corriente *peak* hasta los $341 \mu A$, registrando el máximo valor de la prueba. Esto evidencia que, a partir de este nivel de tensión, la naturaleza del material (Cobre vs. Aluminio) pasa a ser un factor dominante, superando incluso la influencia del diámetro observada en el conductor más delgado (Alliance).
- **100 kV:** A este nivel de tensión crítica, la tendencia gobernada por el diámetro se ve alterada, dando paso a la predominancia del estado superficial y el tipo de material. El conductor Cairo registra la menor corriente *peak* ($169 \mu A$), seguido por el Alliance ($223 \mu A$), manteniendo entre ellos la lógica geométrica. Sin embargo, conductores de mayor calibre como Coreopsis ($252 \mu A$) y Flint ($413 \mu A$) exhiben valores superiores, contradiciendo la regla del diámetro; esto se atribuye a su deterioro superficial, el cual genera puntos de ionización que prevalecen sobre el beneficio de su mayor sección. Finalmente, el conductor de Cobre reafirma su comportamiento desfavorable frente al aluminio, alcanzando el máximo absoluto de corriente *peak* con $500 \mu A$.

Comportamiento del conductor con diferentes condiciones superficiales:

- **Presencia de agua:** La presencia de agua líquida sobre el conductor Cairo reduce drásticamente su tensión crítica, adelantando la aparición del efecto corona en 30 kV respecto al estado seco. Al superar los 80 kV, el agua de la llave y de lluvia generan corrientes *peak* superiores, validando que las gotas actúan como intensificadores locales del campo eléctrico (focos de corona). En contraste, las pruebas con agua salina registraron valores de *peak* inferiores. Este comportamiento atípico se justifica por el efecto de homogeneización conductiva: la alta conductividad de la solución salina favorece la formación de una película superficial cuasi-equipotencial que suaviza el gradiente eléctrico y evita la formación de puntas de descarga (gotas discretas), actuando como un apantallamiento que mitiga la intensidad del pulso, tal como se describe en estudios sobre el comportamiento de películas líquidas bajo campo eléctrico [23].

- **Presencia de arena:** La aplicación de arena sobre el conductor, provoca que la corriente *peak* sea sistemáticamente mayor a la del conductor en estado normal en todo el rango de tensiones evaluado. Comparativamente, esta condición resulta aún más desfavorable que los tres escenarios con agua, registrando valores de corriente superiores. Este comportamiento es coherente con la teoría física: cada partícula sólida adherida a la superficie, distorsiona el campo eléctrico local, actuando como puntos fijos de alta concentración de campo que intensifican la descarga.
- **Presencia de aceite:** En lugar de mitigar el fenómeno, el aceite presentó el desempeño más crítico, generando las corrientes *peak* más altas de todas las condiciones analizadas. Esta discrepancia con lo esperado podría explicarse por una diferencia metodológica respecto a [19]: mientras que dicha referencia describe el control de descargas mediante expulsión de aceite, la aplicación de una película estática y continua sobre el conductor en este estudio parece haber modificado el gradiente y la composición superficial de forma desfavorable, resultando en una intensificación del efecto corona.
- **Presencia de cinta aislante:** Este material destaca como el único recubrimiento capaz de mitigar inicialmente el efecto corona, retrasando su aparición hasta los 90 kV, manteniendo valores de corriente *peak* inferiores al conductor Cairo sin recubrimiento en ese rango. Cabe señalar que esta mejora es específica de las condiciones de laboratorio y no asegura su replicabilidad en entornos reales. De hecho, al alcanzar los 100 kV su desempeño se invierte, registrando un *peak* superior al conductor desnudo. Esta degradación se atribuye a la naturaleza no homogénea del aislamiento: bajo un estrés eléctrico elevado, las burbujas de aire atrapadas entre las capas o en la interfaz del adhesivo actúan como fuentes de descargas parciales que intensifican la actividad de corona global.

En el Anexo 6.1 se presentan, en primer lugar, las tablas resumen con los tiempos de inicio, corte y decaimiento de cada pulso a 100 kV. A continuación, se incluyen las tablas con los valores de la mediana de la corriente *peak* para los distintos conductores y condiciones superficiales, finalizando con las figuras de las formas de onda de la corriente de corona registradas a 100 kV.

5.2.2. Análisis de corriente a partir de modelo cromático

Como se explica en el capítulo 4.1.2, el modelo cromático se ocupará para, evaluar la variación conjunta de las magnitudes cromáticas E_b , f_c y B , identificando tendencias y desplazamientos característicos de los *clusters*, buscando establecer los límites operativos asociados a la corriente de corona.

En los mapas cromáticos se representa en el eje Y la frecuencia central f_c , en el eje Z el ancho de banda B y en el eje X la energía E_b .

Comportamiento de las diferentes topologías de conductores:

En primer lugar, se analiza el conjunto de las diferentes topologías de conductores. El análisis considera dos perspectivas complementarias: por un lado, la comparación de todos los conductores bajo una misma tensión de prueba (figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9); y, por otro, la observación del comportamiento cromático de un mismo conductor frente a las diferentes tensiones aplicadas (figuras 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14).

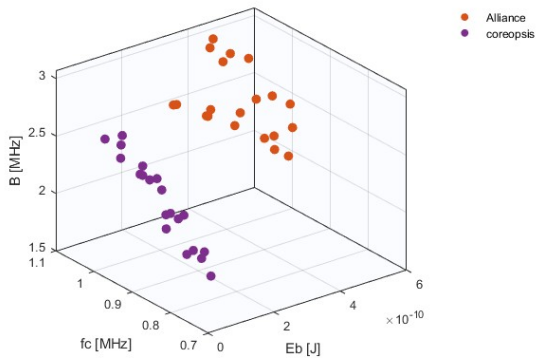


Figura 5.5: Análisis cromático para diferentes topologías de conductores a 60 kV, (Elaboración propia).

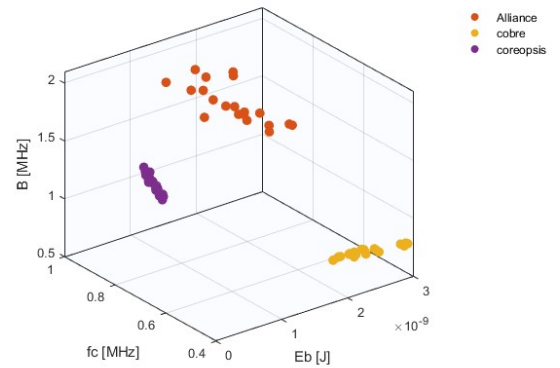


Figura 5.6: Análisis cromático para diferentes topologías de conductores a 70 kV, (Elaboración propia).

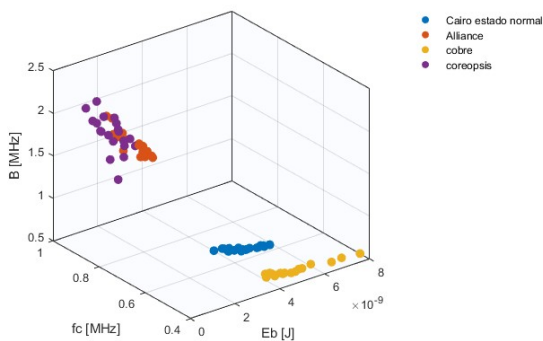


Figura 5.7: Análisis cromático para diferentes topologías de conductores a 80 kV, (Elaboración propia).

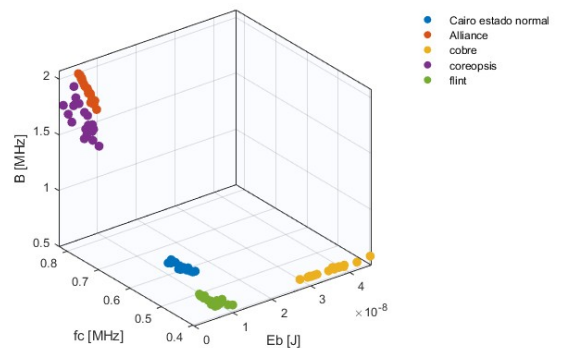


Figura 5.8: Análisis cromático para diferentes topologías de conductores a 90 kV, (Elaboración propia).

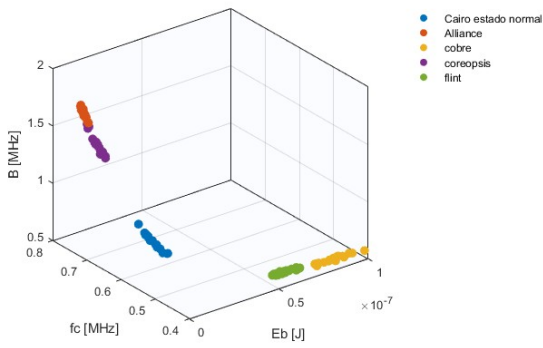


Figura 5.9: Análisis cromático para diferentes topologías de conductores a 100 kV, (Elaboración propia).

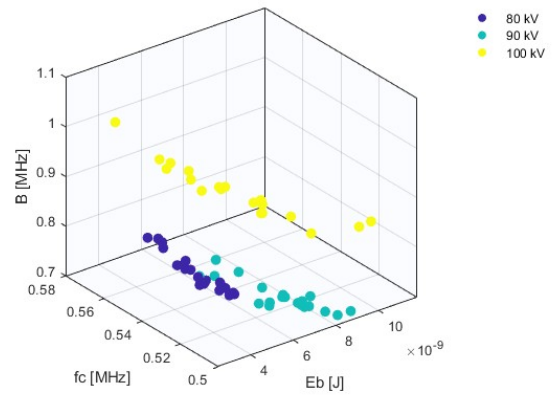


Figura 5.10: Análisis cromático para conductor Cairo sin recubrimientos, (Elaboración propia).

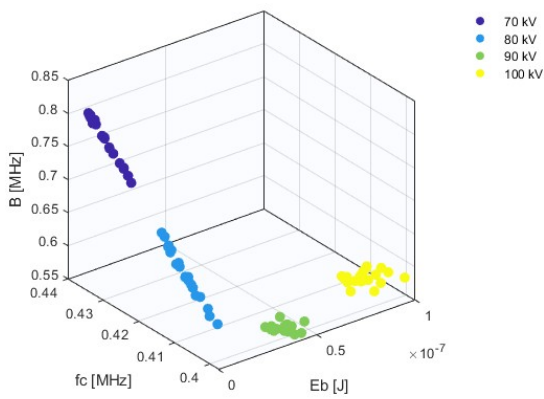


Figura 5.11: Análisis cromático para conductor Cobre, (Elaboración propia).

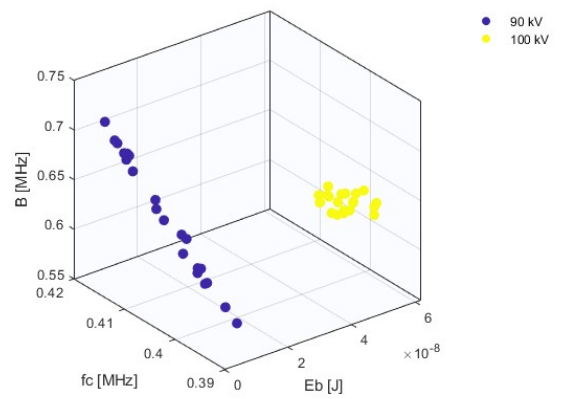


Figura 5.12: Análisis cromático para conductor Flint, (Elaboración propia).

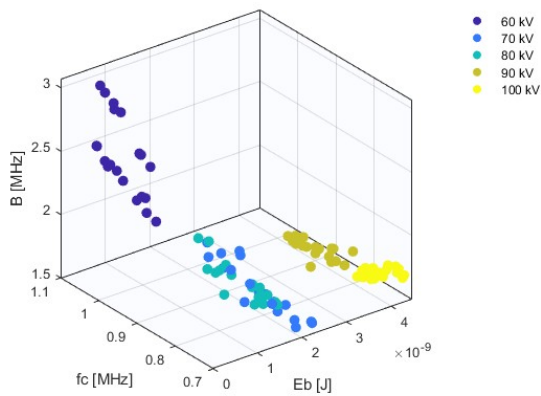


Figura 5.13: Análisis cromático para conductor Alliance, (Elaboración propia).

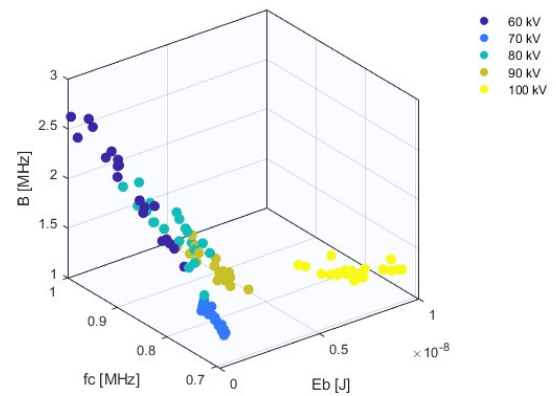


Figura 5.14: Análisis cromático para conductor Coreopsis, (Elaboración propia).

- **60 kV:** Se registran únicamente los conductores Alliance y Coreopsis. Alliance presenta mayor energía E_b , mientras que f_c y B toman valores similares para ambos conductores, con una cierta dispersión dentro de un mismo rango, sin separación cromática marcada entre ellos.
- **70 kV:** Aparecen tres *clusters* correspondientes a Alliance, Coreopsis y Cobre. Cobre presenta la mayor energía E_b junto con los menores valores de f_c y B . Alliance se ubica con f_c y B más altos, mientras que Coreopsis, al ser el conductor de mayor diámetro, muestra menor energía y una posición intermedia en f_c y B .
- **80 kV:** Se incorpora Cairo, ubicado en una zona de energía intermedia entre Coreopsis y Cobre. Su ancho cromático B es similar al de Cobre (menor que el de Alliance y Coreopsis), manteniendo la tendencia observada en tensiones anteriores, donde los conductores con mayor energía tienden a mostrar menores valores de B .
- **90 kV:** Aparece Flint, con energía comparable a la de Cairo, frecuencia central f_c más baja y ancho cromático B similar al de Cairo y Cobre. El resto de los conductores mantiene el comportamiento observado a 80 kV, reforzando la separación entre conductores de mayor y menor energía.
- **100 kV:** Se aprecia que el conductor de cobre es el que presenta mayor energía E_b , seguido por Flint. Ambos se caracterizan por valores relativamente bajos de f_c y B en comparación con Cairo, Coreopsis y Alliance, cuyos *clusters* se concentran en frecuencias centrales y anchos de banda más altos. Este comportamiento indica que las descargas en Cobre y Flint se asocian a una mayor concentración de energía en componentes de baja frecuencia y a una menor dispersión espectral.
- **Cairo:** Presenta una relación inversa clara entre E_b y B : los pulsos de menor energía se ubican en zonas de mayor ancho cromático, mientras que los de mayor energía se concentran en regiones

de menor B . Los *clusters* de 80, 90 y 100 kV se solapan parcialmente, lo que indica diferencias relativamente pequeñas en energía y en frecuencia central f_c entre estas tensiones.

- **Cobre:** Se evidencia una relación directa entre la tensión aplicada y la energía E_b : a medida que la tensión aumenta, E_b también se incrementa. Simultáneamente, se observa una disminución progresiva tanto en la frecuencia central f_c como en el ancho de banda B , indicando que, a mayores tensiones, la energía de la descarga tiende a concentrarse en bajas frecuencias y a presentar menor dispersión espectral.
- **Alliance:** Sigue la misma tendencia inversa E_b-B . Se observa además que, para energías bajas, la dispersión en f_c es mayor (particularmente en 70 y 80 kV), mientras que los grupos correspondientes a 90 y 100 kV son más compactos, evidenciando un comportamiento más estable a mayores tensiones.
- **Coreopsis:** Se distinguen tres subconjuntos cromáticos: (60–70 kV), (80–90 kV) y (100 kV). El grupo de 60–70 kV corresponde a las menores energías, con un amplio rango de f_c y valores altos de B . A medida que aumenta la tensión, E_b crece y B disminuye, confirmando la relación inversa entre ambas magnitudes para este conductor.
- **Flint:** Presenta esencialmente dos niveles de energía bien diferenciados. La medición de menor energía muestra valores de B más altos y mayor dispersión de f_c , mientras que la medición de mayor energía se ubica en una zona de menor ancho cromático, coherente con la tendencia general observada.

En síntesis, los resultados para las diferentes topologías de conductores, muestran que todas las mediciones se localizan dentro de un mismo sector cromático, correspondiente a frecuencias centrales medias, aproximadamente entre 0,3 y 1,1 MHz, y anchos de banda entre bajos a medios ($0.5 < B < 3$ MHz), lo que caracteriza el dominio espectral típico de los eventos de descarga de corona analizados.

Dentro de este dominio, se evidencia una relación inversa y consistente entre la energía E_b y el ancho de banda B en todos los conductores y niveles de tensión. Esto indica que, a medida que aumenta la energía liberada por la descarga, el espectro tiende a concentrarse y el ancho de banda disminuye, reflejando una menor dispersión frecuencial del pulso. Este patrón se mantiene tanto entre distintos conductores como entre las tensiones aplicadas a un mismo conductor, lo que sugiere un comportamiento cromático estable y característico del régimen de descarga corona.

Comportamiento del conductor con diferentes condiciones superficiales:

En segundo lugar, se analiza el conjunto compuesto por los distintos recubrimientos ensayados sobre el conductor Cairo. Al igual que en el caso anterior, el análisis considera dos perspectivas: la comparación de todos los recubrimientos bajo una misma tensión de prueba (figuras 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19,

5.20) y la observación del comportamiento cromático de un mismo recubrimiento frente a las diferentes tensiones aplicadas (figuras 5.21, 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26).

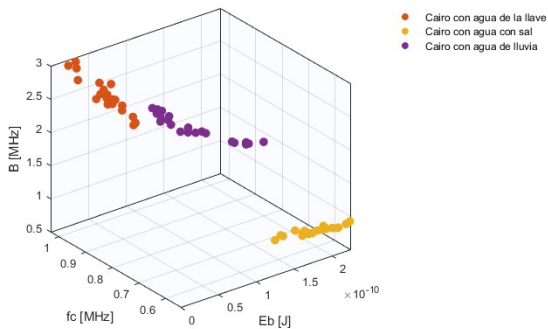


Figura 5.15: Análisis cromático para el conductor con diferentes condiciones superficiales a 50 kV, (Elaboración propia).

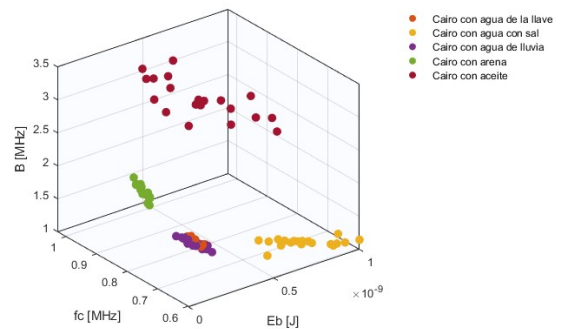


Figura 5.16: Análisis cromático para el conductor con diferentes condiciones superficiales a 60 kV, (Elaboración propia).

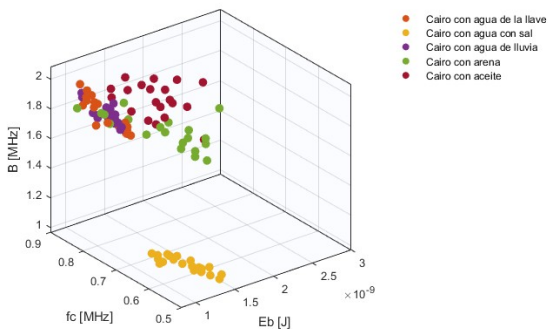


Figura 5.17: Análisis cromático para el conductor con diferentes condiciones superficiales a 70 kV, (Elaboración propia).

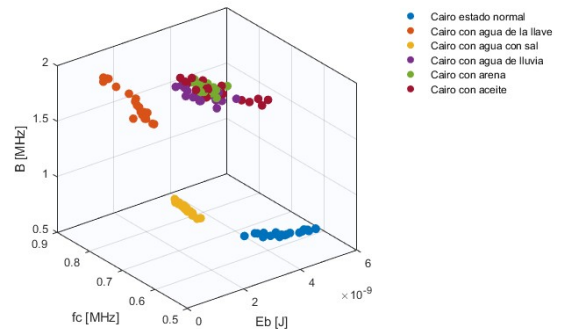


Figura 5.18: Análisis cromático para el conductor con diferentes condiciones superficiales a 80 kV, (Elaboración propia).

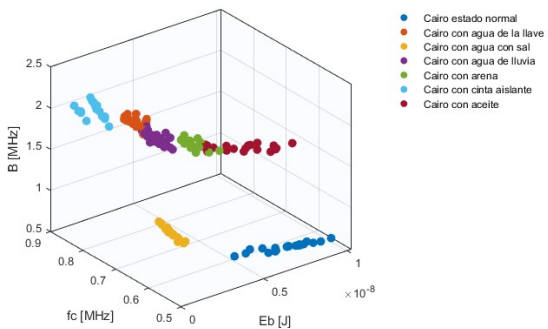


Figura 5.19: Análisis cromático para el conductor con diferentes condiciones superficiales a 90 kV, (Elaboración propia).

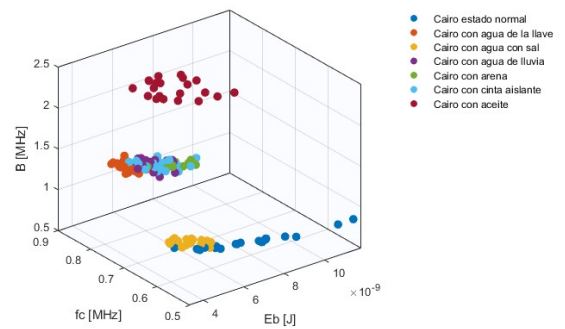


Figura 5.20: Análisis cromático para el conductor con diferentes condiciones superficiales a 100 kV, (Elaboración propia).

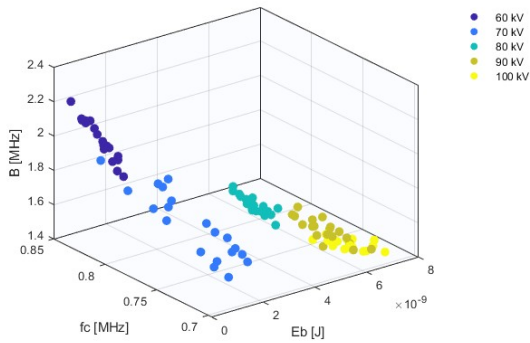


Figura 5.21: Análisis cromático para conductor Cairo con Arena, (Elaboración propia).

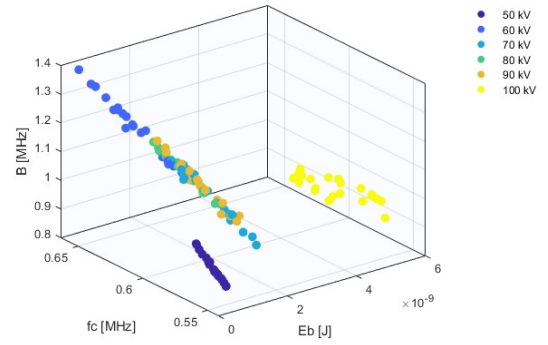


Figura 5.22: Análisis cromático para conductor Cairo con Agua con sal, (Elaboración propia).

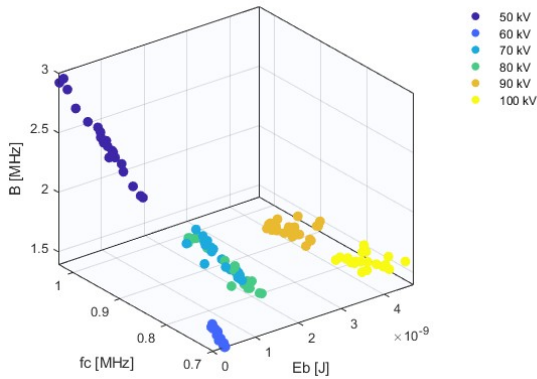


Figura 5.23: Análisis cromático para conductor Cairo con Agua de la llave, (Elaboración propia).

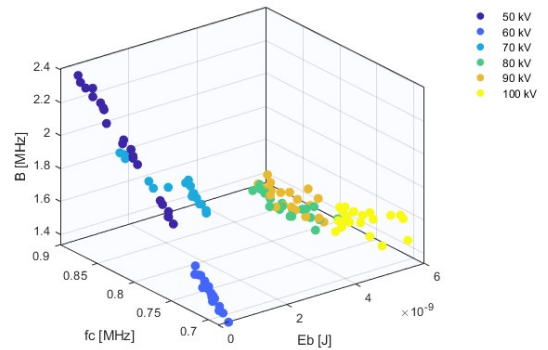


Figura 5.24: Análisis cromático para conductor Cairo con Agua de lluvia, (Elaboración propia).

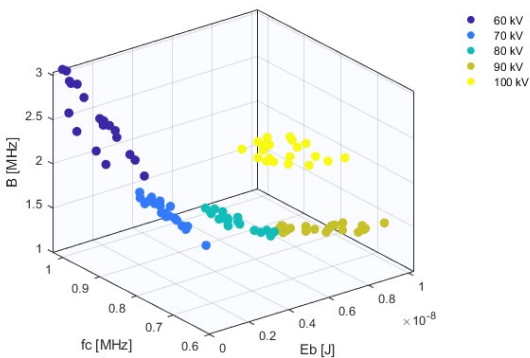


Figura 5.25: Análisis cromático para conductor Cairo con Aceite, (Elaboración propia).

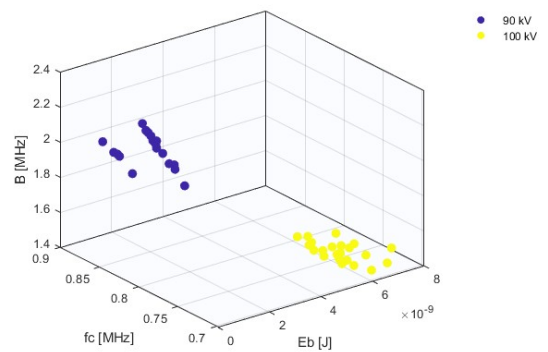


Figura 5.26: Análisis cromático para conductor Cairo con Cinta aislante, (Elaboración propia).

- **50 kV:** Se registran únicamente los recubrimientos con agua con sal, agua de la llave y agua de lluvia. El agua con sal presenta el *cluster* más energético, con valores de f_c y B más bajos que los de los otros dos recubrimientos. El agua de lluvia exhibe mayor energía E_b que el agua de la llave, pero con los mayores valores de f_c y B del conjunto.
- **60 kV:** Se añaden los recubrimientos con aceite y arena. El aceite se ubica en la región de mayor energía E_b , con un ancho cromático B elevado y f_c distribuido principalmente entre 0,7 y 1 MHz. La arena se agrupa en una zona de B y f_c altos (en torno a 1 MHz), pero con un rango de E_b similar al del agua de la llave y el agua de lluvia. El agua con sal continúa mostrando altos niveles de energía con valores relativamente bajos de B y f_c .
- **70 kV:** Se mantienen los mismos recubrimientos. El agua con sal presenta ahora niveles de energía similares a los de las otras aguas, mientras que estas, junto con la arena y el aceite, forman un gran grupo cromático con B entre aproximadamente 1,6 y 2 MHz y f_c entre 0,8 y 0,9 MHz.
- **80 kV:** Se incorpora el Cairo en estado normal. Este se ubica en la región de mayor energía E_b , pero con los menores valores de B y f_c de todos los *clusters*. A un nivel similar de energía se encuentran el aceite, la arena y el agua de lluvia, aunque con valores de B y f_c más altos. El agua de la llave se sitúa a una energía ligeramente inferior, y el agua con sal presenta un nivel energético comparable al del agua de la llave, pero con un ancho cromático B próximo al del Cairo sin recubrimiento.
- **90 kV:** Se añade la cinta aislante, que se ubica en la región de menor energía E_b del mapa, pero con los mayores valores de B y f_c . A medida que se incrementa la energía, se suceden agua de la llave, agua de lluvia, arena y aceite, todos ellos con valores similares de B y f_c . El Cairo sin recubrimiento alcanza niveles energéticos comparables a los del aceite, pero manteniendo los valores más bajos de B y f_c ; el agua de lluvia conserva una ubicación cercana a la observada en la tensión anterior.
- **100 kV:** Se identifican tres grupos cromáticos bien diferenciados. El primero está constituido por el recubrimiento con aceite, cuyo *cluster* presenta la mayor energía E_b , junto con los valores más altos de f_c y B . El segundo grupo lo conforman agua de la llave, agua de lluvia, arena y cinta aislante, que muestran valores similares entre sí de E_b , f_c y B : en todos los casos, la energía es menor que la del aceite, con f_c en torno a 0,8–0,9 MHz y B de valor medio. El tercer grupo corresponde al Cairo en estado base y al recubrimiento con agua con sal, los cuales exhiben frecuencias centrales y anchos cromáticos más bajos; dentro de este grupo, Cairo presenta una mayor dispersión en los niveles energéticos, mientras que el recubrimiento con agua salada se concentra en una región más acotada del espacio cromático.
- **Agua con sal:** Para este recubrimiento se distinguen tres grupos ordenados por energía. A 50 kV se observan las menores energías, con valores bajos de B y f_c . A 100 kV aparece el *cluster* de mayor

energía, manteniendo valores reducidos de B y f_c . Las tensiones intermedias constituyen un tercer grupo de energía media, donde las tensiones más bajas tienden a presentar mayores valores de B y f_c que las más altas.

- **Agua de lluvia:** Se identifican dos grupos principales. El primero, correspondiente a tensiones bajas (50, 60 y 70 kV), presenta las menores energías E_b y los mayores valores de B , con f_c distribuido en un rango amplio. El segundo grupo, asociado a tensiones altas (80, 90 y 100 kV), se concentra en la región de mayor energía y en niveles bajos de B , con f_c moderado.
- **Agua de la llave:** Su comportamiento es similar al del agua de lluvia, aunque se distinguen tres grupos. El primero agrupa 50 y 60 kV con las menores energías: a 50 kV se observan los mayores valores de B y f_c , mientras que a 60 kV se registran los menores. El segundo grupo (70 y 80 kV) presenta energías medias y bajos valores de B , con f_c en un rango intermedio. El tercer grupo (90 y 100 kV) es el de mayor energía, manteniendo valores bajos de B y f_c , siendo ligeramente menores en 100 kV que en 90 kV.
- **Arena:** Se observan dos grupos generales. El primero, de baja energía, corresponde a 60 y 70 kV: a 60 kV se obtienen valores altos de B y f_c , mientras que a 70 kV los puntos aparecen más dispersos en el plano (f_c, B). El segundo grupo reúne 80, 90 y 100 kV, con *clusters* ubicados en niveles similares de E_b y B ; dentro de este grupo, la tensión más baja presenta los mayores valores de f_c , que disminuyen gradualmente al aumentar la tensión.
- **Aceite:** Se evidencia una relación directa entre la tensión aplicada y la energía E_b : a medida que la tensión aumenta, E_b también se incrementa. Simultáneamente, se observa una disminución progresiva tanto en f_c como en B , indicando que, a mayores tensiones (exceptuando el caso de 100 kV), la energía de la descarga tiende a concentrarse en bajas frecuencias y a presentar menor dispersión espectral. Para 100 kV se aprecia un aumento de f_c respecto de tensiones inmediatamente inferiores, lo que rompe parcialmente la tendencia y puede asociarse a la elevada tensión aplicada sobre el conductor.
- **Cinta aislante:** Se identifican dos grupos. El primero, asociado a la menor tensión de ensayo, presenta la menor energía y los mayores valores de B y f_c del mapa cromático. El segundo, correspondiente a la mayor tensión, se ubica en la región de mayor energía, pero con niveles bajos de B y f_c , lo que indica un espectro más concentrado.

En síntesis, los resultados para el conductor con diferentes condiciones superficiales, muestran que las mediciones se ubican dentro de un sector cromático similar al del comportamiento de las diferentes topologías de conductores, asociado a frecuencias centrales medias, aproximadamente entre 0,5 y 1 MHz. El límite inferior coincide con el del Cairo sin recubrimiento, mientras que el límite superior se ve

levemente modificado por las diferentes condiciones superficiales probadas. En todos los casos, el ancho de banda se mantiene en el rango $0,5 < B < 3$ MHz, lo que indica que el efecto corona, tanto para distintos recubrimientos como para diferentes conductores, se desarrolla en dominios espectrales comparables. En conjunto, este comportamiento sugiere que el aumento de la tensión produce pulsos más energéticos pero, en general, espectralmente más concentrados, reforzando la tendencia inversa entre E_b y B observada con las diferentes topologías de conductores.

5.3. Ruido audible

El análisis del ruido audible de corona (RA) se centra en la comparación de los niveles sonoros registrados entre los distintos conductores y las diferentes condiciones superficiales bajo prueba, de acuerdo con lo establecido en el capítulo 4.2 y seguirá el protocolo descrito en el capítulo 3.3.2.

5.3.1. Comparación para diferentes topologías de conductores

En la Tabla 5.1 se presentan los valores de RA correspondientes a las diferentes topologías de conductores en función de la tensión aplicada, tal como se representa en la figura 5.27. Del análisis de estas mediciones se desprende que:

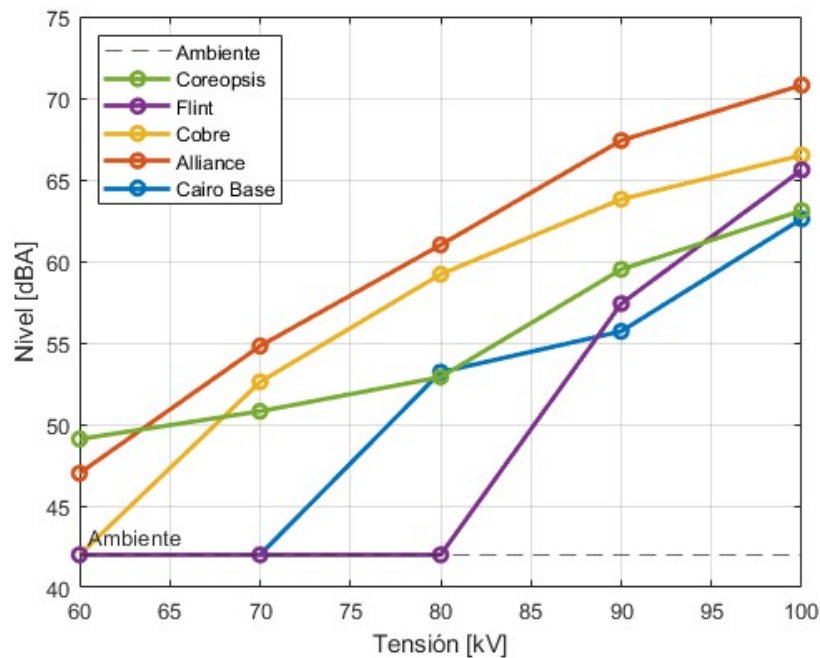


Figura 5.27: Ruido corona captado por sonómetro en dBA para diferentes topologías de conductores, (Elaboración propia).

- **60 kV:** A este nivel de tensión inicial, solo los conductores Coreopsis y Alliance logran superar el umbral de ruido de fondo (42 dBA). El conductor Coreopsis registra el máximo nivel con 49,1 dBA, un comportamiento atípico para su gran diámetro que confirma la influencia crítica del daño superficial (hebra cortada) como generador de ruido. Por su parte, el conductor Alliance alcanza los 47 dBA, validando la premisa geométrica donde su reducido diámetro facilita la aparición temprana de corona audible.
- **70 kV:** Se suma a la actividad acústica el conductor de Cobre, registrando 52,6 dBA. Esto contrasta con el conductor Cairo, que se mantiene en 42 dBA a pesar de tener un diámetro similar; esta discrepancia valida la premisa de que el cobre genera mayores niveles de ruido audible que el aluminio bajo condiciones geométricas equivalentes. En el panorama general, el conductor Alliance (54,8 dBA) se mantiene como el emisor predominante debido a su menor sección, seguido por el Cobre y el Coreopsis (50,8 dBA).
- **80 kV:** En este nivel, el conductor Cairo supera por primera vez el umbral de ruido ambiente registrando 53,2 dBA, un valor comparable al del Coreopsis (52,9 dBA). No obstante, ambos se mantienen claramente por debajo del Alliance (61 dBA) y del Cobre (59,2 dBA). Esta distribución de niveles ratifica las tendencias observadas: el menor diámetro del Alliance y la naturaleza del material en el Cobre actúan como factores determinantes para intensificar la emisión acústica frente a los conductores de aluminio de mayor calibre.
- **90 kV:** Se incorpora el conductor Flint registrando 57,4 dBA. En este escenario, el Cairo se consolida con el mejor desempeño acústico (55,7 dBA), situándose por debajo de Flint y Coreopsis (59,5 dBA), cuyo mayor nivel de ruido se atribuye directamente a su condición superficial degradada. Por su parte, el conductor de Cobre continúa superando (63,8 dBA) a sus contrapartes de aluminio, mientras que el Alliance lidera las mediciones con 67,4 dBA, demostrando que tener un menor diámetro facilita la generación de ruido.
- **100 kV:** La intensidad del fenómeno alcanza sus máximos, con el conductor Alliance registrando 70,8 dBA, el valor más alto del conjunto. Le sigue el Cobre con 66,5 dBA, reafirmando la mayor emisión acústica de este material frente al aluminio. Resulta relevante que el Cairo (62,6 dBA) presente niveles inferiores al Flint (65,6 dBA) y al Coreopsis (63,1 dBA); a pesar de que estos últimos poseen mayor calibre, su deterioro superficial prevalece negativamente sobre la ventaja geométrica, penalizando su desempeño. Finalmente, la influencia del diámetro se hace evidente al observar la tendencia global, donde el ruido decae progresivamente desde el conductor más delgado (Alliance) hacia los de mayor sección, siempre que se mantenga la integridad de la superficie.

Tabla 5.1: Mediciones de ruido audible [dBA] para diferentes topologías de conductores, medido con sonómetro.

Conductor	Cairo Base	Alliance	Cobre	Flint	Coreopsis
60	42	47	42	42	49,1
70	42	54,8	52,6	42	50,8
80	53,2	61	59,2	42	52,9
90	55,7	67,4	63,8	57,4	59,5
100	62,6	70,8	66,5	65,6	63,1

El análisis de los niveles de ruido audible ratifica que la emisión acústica está gobernada por la interacción entre la geometría, el estado superficial y el material del conductor. En el rango de bajas tensiones (60–70 kV), la actividad supera el ruido ambiente solo en los conductores con desventajas críticas: Coreopsis (daño superficial), Alliance (diámetro reducido) y Cobre (material). Al elevar la tensión a 80 kV, la incorporación del conductor Cairo con valores mínimos confirma que el aluminio de mayor calibre ofrece el mejor desempeño. A partir de los 90 kV y hasta los 100 kV, el ordenamiento de los niveles sonoros evidencia una competencia entre factores: si bien el Cairo (buena condición) se mantiene como el nivel sonoro más bajo, el deterioro superficial del Flint y Coreopsis penaliza su rendimiento pese a su espesor. Finalmente, el hecho de que el conductor Alliance registre los valores máximos (> 70 dBA) confirma que la reducción del diámetro es el factor más determinante en la generación de ruido, prevaleciendo incluso sobre las variables de estado y material.

5.3.2. Comparación para el conductor con diferentes condiciones superficiales

En la Tabla 5.2 se detallan los valores de RA correspondientes a las distintas condiciones superficiales del conductor en función de la tensión aplicada, tal como se visualiza en la figura 5.28. Al analizar estos datos, se observa que:

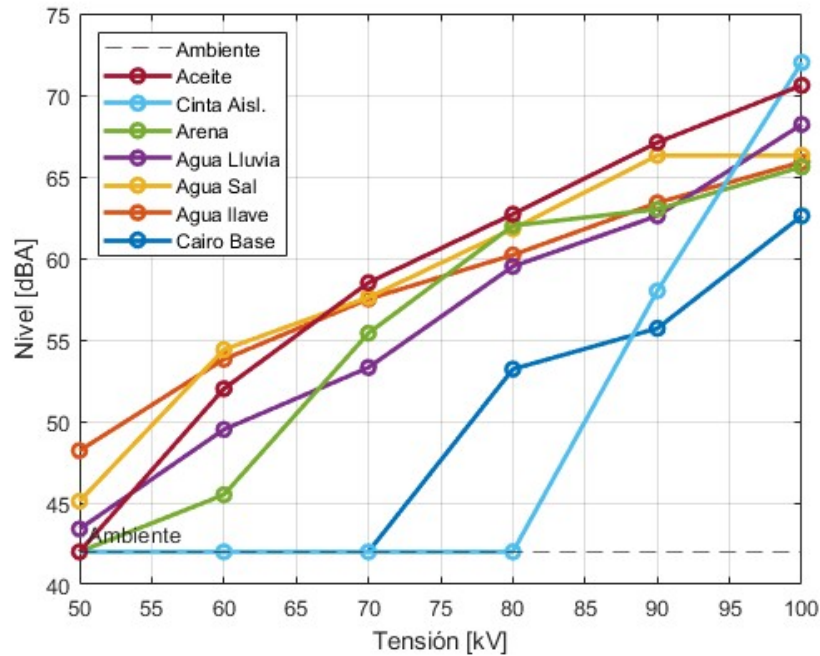


Figura 5.28: Ruido corona captado por sonómetro en dBA para el conductor con diferentes condiciones superficiales, (Elaboración propia).

- **50 kV:** En esta etapa inicial, la actividad acústica es exclusiva de las condiciones húmedas. El agua potable registra el mayor nivel de ruido (48, 2 dBA), seguida por el agua con sal (45, 1 dBA) y, con menor intensidad, la lluvia (43, 4 dBA). Esto evidencia que la presencia de gotas sobre el conductor precipita la aparición del efecto corona al intensificar el campo eléctrico local, mientras que el conductor seco y los otros recubrimientos permanecen en silencio.
- **60 kV:** Se suman a la actividad audible la arena y el aceite. La arena (45, 5 dBA) confirma su impacto negativo al aumentar el gradiente superficial del conductor. Por su parte, el aceite genera un ruido considerable (52 dBA), superando a la arena y situándose cerca de los niveles del agua potable (53, 8 dBA) y el agua con sal (54, 4 dBA), lo que sugiere que la película de aceite comienza a perder estabilidad o uniformidad, alterando el campo eléctrico.
- **70 kV:** Aunque se mantienen activos los mismos cinco recubrimientos, cambia la jerarquía de ruido: el aceite se posiciona como la condición más desfavorable con 58, 5 dBA, superando incluso a las condiciones de agua y arena. Este incremento acelerado contradice la expectativa de supresión y apunta a una alteración severa del gradiente superficial por el recubrimiento dieléctrico líquido.
- **80 kV:** El conductor Cairo base supera por primera vez el umbral ambiente registrando 53, 2 dBA. A pesar de esto, se mantiene como la configuración más silenciosa del grupo, demostrando que

un conductor limpio y sin recubrimientos (o contaminantes) constituye la condición óptima para minimizar el ruido audible en comparación con cualquiera de las superficies intervenidas.

- **90 kV:** Se marca un punto de inflexión para la cinta aislante, que pierde su capacidad de supresión y comienza a generar ruido (58 dBA), ubicándose como la segunda opción de menor emisión tras el conductor base. En el extremo opuesto, el aceite consolida su posición como el recubrimiento más ruidoso (67, 1 dBA), distanciándose aproximadamente 4 dBA del resto de los contaminantes (aguas y arena), que oscilan entre 62 y 63 dBA.
- **100 kV:** El escenario final revela la degradación crítica de la cinta aislante: tras haber contenido el ruido en etapas previas, se dispara a 72 dBA, convirtiéndose en la condición más ruidosa de todo el experimento (casi 10 dBA por encima del conductor base). El aceite (70, 6 dBA) y la lluvia (68, 2 dBA) le siguen en intensidad. En contraste, el conductor Cairo base (62, 6 dBA) reafirma su robustez, manteniéndose sistemáticamente con los menores niveles de ruido audible frente a todas las condiciones de contaminación o recubrimiento evaluadas.

Tabla 5.2: Mediciones de ruido audible [dBA] para el conductor con diferentes condiciones superficiales, medido con sonómetro.

Conductor	Cairo Base	Agua llave	Agua Sal	Agua Lluvia	Arena	Cinta Aisl.	Aceite
50	42	48,2	45,1	43,4	42	42	42
60	42	53,8	54,4	49,5	45,5	42	52
70	42	57,5	57,6	53,3	55,4	42	58,5
80	53,2	60,2	61,8	59,5	62	42	62,7
90	55,7	63,3	63,6	62,6	63,4	58	67,1
100	62,6	65,9	66,3	68,2	65,5	72	70,6

El análisis de las diferentes condiciones superficiales permite concluir que cualquier alteración de la homogeneidad del conductor, ya sea por contaminación o recubrimiento, degrada su desempeño acústico en comparación con su estado limpio. Los recubrimientos basados en agua y la presencia de arena adelantan el inicio del efecto corona, provocando la aparición de ruido audible a tensiones más bajas y manteniendo niveles sistemáticamente superiores a los del conductor Cairo base. Físicamente, esto se explica porque tanto las gotas de agua como los granos de arena actúan como intensificadores locales del gradiente superficial del conductor, introduciendo nuevos focos de corona que reducen la tensión de inicio y aumentan la densidad de las descargas en todo el rango analizado. Por su parte, el aceite no cumple con la premisa inicial de mitigación, posicionándose entre los 70 kV y 90 kV como el recubrimiento más ruidoso de la muestra. Este comportamiento sugiere que la película de aceite, al no ser uniforme bajo estrés eléctrico, actúa de forma análoga al agua al modificar desfavorablemente el gradiente superficial y multiplicar los puntos de descarga activa. Finalmente, la cinta aislante presenta un comportamiento dual:

actúa como una barrera dieléctrica eficaz en tensiones inferiores a los 80 kV, pero su efecto se invierte drásticamente a partir de los 90 kV, alcanzando los 72 dBA a 100 kV y convirtiéndose en la condición más ruidosa del estudio. Esta transición se atribuye a la naturaleza heterogénea del encintado, donde la formación de burbujas de aire entre las capas y la presencia del adhesivo generan inhomogeneidades en el gradiente que, al ionizarse, actúan como focos de corona de alta intensidad. En definitiva, los resultados confirman que el conductor Cairo en estado limpio y seco constituye la configuración más favorable, evitando la creación de agentes externos que disparen el ruido audible.

5.4. Análisis *peak* de corriente, junto al ruido audible.

A partir de lo detallado en la sección 4.3, en este apartado se analizan en conjunto la corriente *peak* y el ruido audible para entender cómo se conectan entre sí. El propósito es verificar si el comportamiento eléctrico del conductor sirve como un indicador directo de la intensidad del sonido emitido.

5.4.1. Comparación para diferentes topologías de conductores

En este apartado se vera si existe una relación entre la corriente *peak* y el ruido audible, para las diferentes topologías de conductores. En la figura 5.29 se pueden ver los cambios de ruido y corriente para las diferentes tensiones de todos los conductores probados.

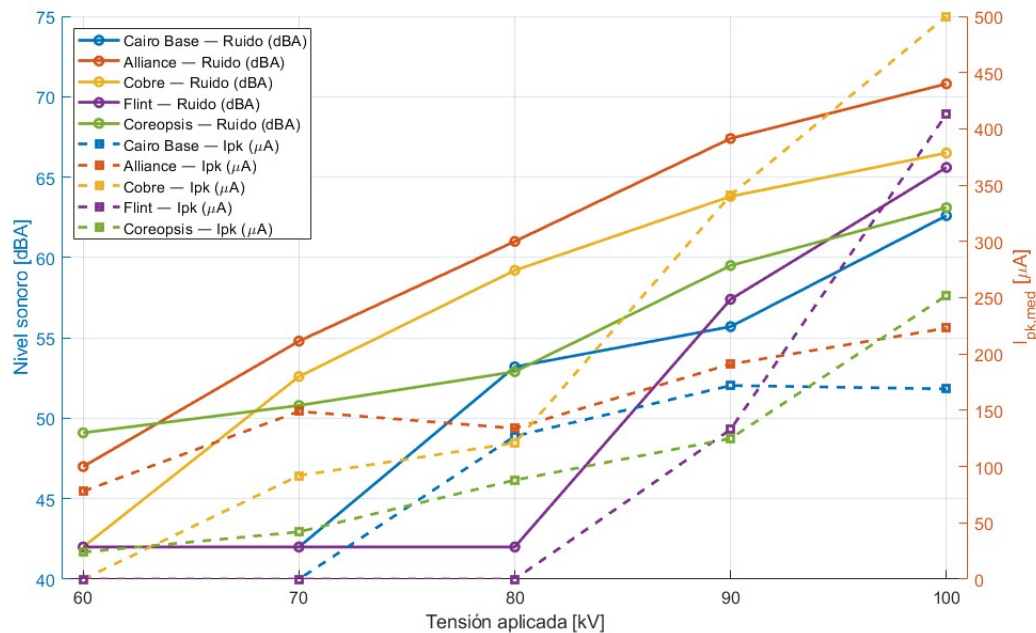


Figura 5.29: Representación de nivel sonoro y corriente *peak* para las diferentes topologías de conductores en las distintas tensiones de operación, (elaboración propia).

De la figura 5.29 se observa que, en general, el incremento de la tensión aplicada eleva tanto el ruido audible (RA) como la corriente $peak$ (I_{pk}). No obstante, este comportamiento no es estrictamente proporcional entre conductores: a 100 kV, el Cobre alcanza el mayor I_{pk} ($> 500 \mu A$), mientras que el Alliance lidera la emisión sonora (70,8 dBA), demostrando que la mayor magnitud eléctrica no implica necesariamente el mayor impacto acústico. Asimismo, se identifican intervalos de desacople donde el ruido aumenta a pesar de registrarse leves descensos en la corriente, tales como en el Alliance entre 70 kV \rightarrow 80 kV y en el Cairo Base entre 90 kV \rightarrow 100 kV. En definitiva, aunque no existe una dependencia lineal absoluta entre ambos parámetros, se confirma que la aparición de cualquier pulso de corriente asociado a corona garantiza la superación del ruido ambiente, validando la conexión física entre ambos fenómenos.

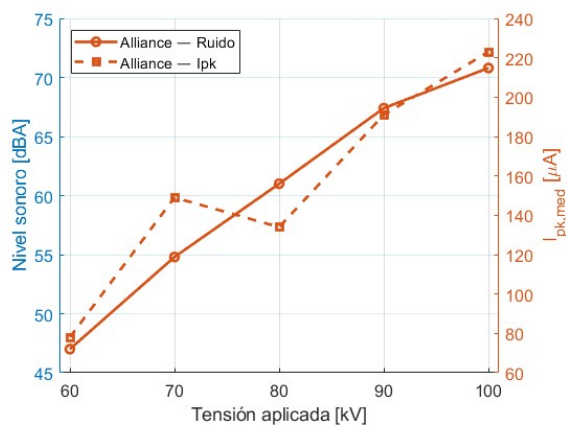


Figura 5.30: Variación de la corriente $peak$ y el ruido audible para el conductor Alliance, (elaboración propia).

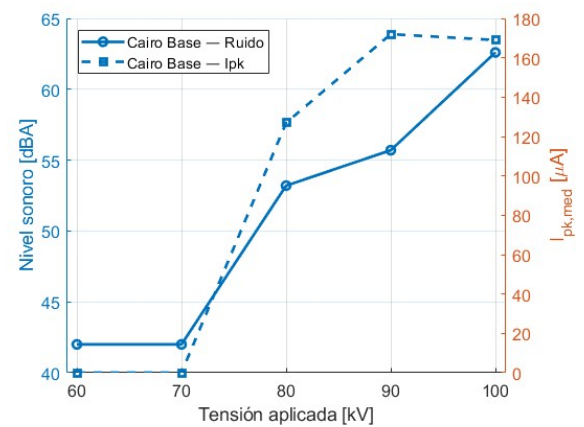


Figura 5.31: Variación de la corriente $peak$ y el ruido audible para el conductor Cairo, (elaboración propia).

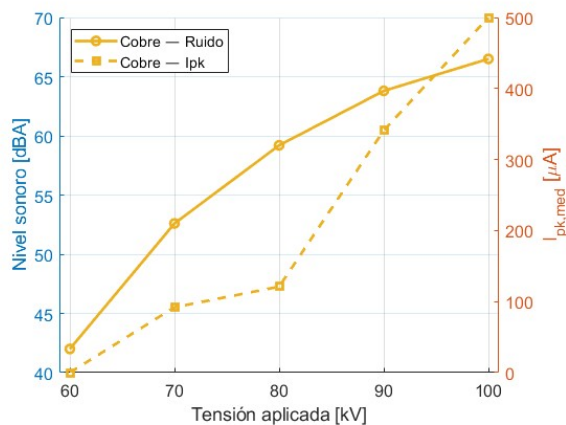


Figura 5.32: Variación de la corriente $peak$ y el ruido audible para el conductor Cobre, (elaboración propia).

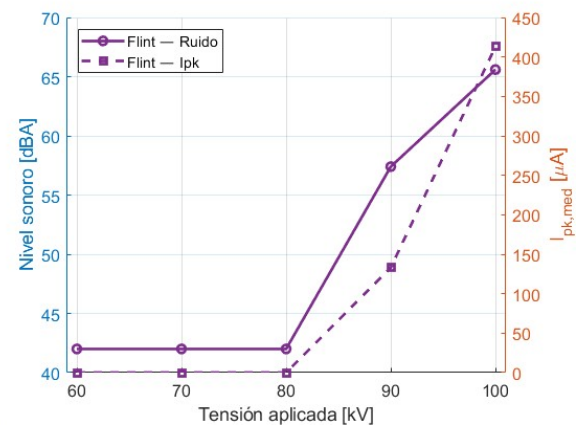


Figura 5.33: Variación de la corriente $peak$ y el ruido audible para el conductor Flint, (elaboración propia).

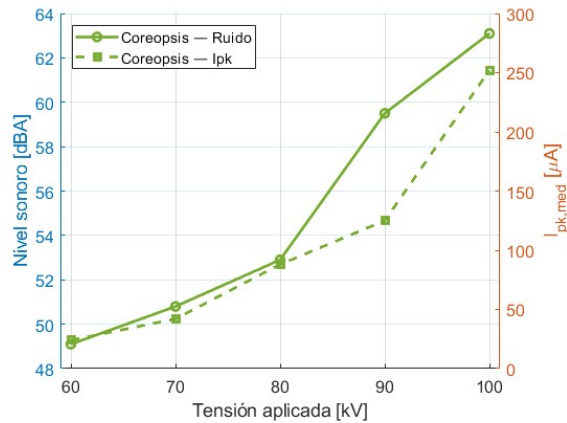


Figura 5.34: Variación de la corriente *peak* y el ruido audible para el conductor Coreopsis, (elaboración propia).

En las figuras 5.30, 5.31, 5.32, 5.33 y 5.34, se pueden observar los cambios en corriente y en ruido para cada conductor por separado. Aplicando la ecuación (5.2) obtenemos el porcentaje de variación de la corriente y el ruido audible en referencia a su valor en la tensión anterior.

$$\% \Delta x = \frac{x_k - x_{k-1}}{x_{k-1}} \quad (5.2)$$

A partir de esto se puede observar que:

- En todos los conductores existe una tendencia general al incremento de I_{pk} y del ruido al aumentar la tensión, aunque la rapidez del incremento cambia según el conductor, evidenciando intervalos “críticos” donde el aumento es más abrupto, como el del Cobre, cuya corriente crece un 181,8 % entre los 80 → 90 kV o el Flint presenta el mayor incremento del 210,5 % entre los 90 → 100 kV, esto para la corriente.
- La aparición de I_{pk} distinto de cero ocurre a tensiones diferentes según el conductor, lo que sugiere distintos niveles de susceptibilidad al inicio del efecto corona. En estos casos, como el Cairo o el Flint, debido a que su superficie está en mejor estado, soporta una mayor tensión antes de ionizar el aire. Pero en el caso del Flint el disparo posterior de los valores sugiere que, aunque su exterior es íntegro, posibles daños internos activan descargas masivas al alcanzar campos eléctricos intensos.
- Se observan intervalos donde el ruido aumenta aun cuando I_{pk} disminuye levemente, como en el Alliance entre 70 kV → 80 kV y en Cairo Base entre 90 kV → 100 kV. Esto indica que la relación entre emisión acústica y corriente *peak* no es estrictamente proporcional en todos los regímenes.

En síntesis, la cuantificación de los resultados revela que, una variación de la corriente *peak*, sea positiva o negativa, no conlleva un cambio proporcional ni en el mismo sentido para el ruido audible. Esto

se explica porque la emisión sonora mantiene una correlación con el incremento de la tensión aplicada, aumentando de forma sostenida aun cuando la magnitud eléctrica presenta leves descensos en tramos específicos. Sin embargo, la aparición de corriente de corona garantiza la aparición de ruido audible en el conductor, ratificando la existencia de una conexión entre ambos parámetros.

5.4.2. Comparación para el conductor con diferentes condiciones superficiales

En este apartado se vera si existe una relación entre la corriente *peak* y el ruido audible, para las diferentes condiciones superficiales bajo prueba. En la figura 5.35 se pueden ver los cambios de ruido y corriente para las diferentes tensiones de todos las condiciones superficiales probadas.

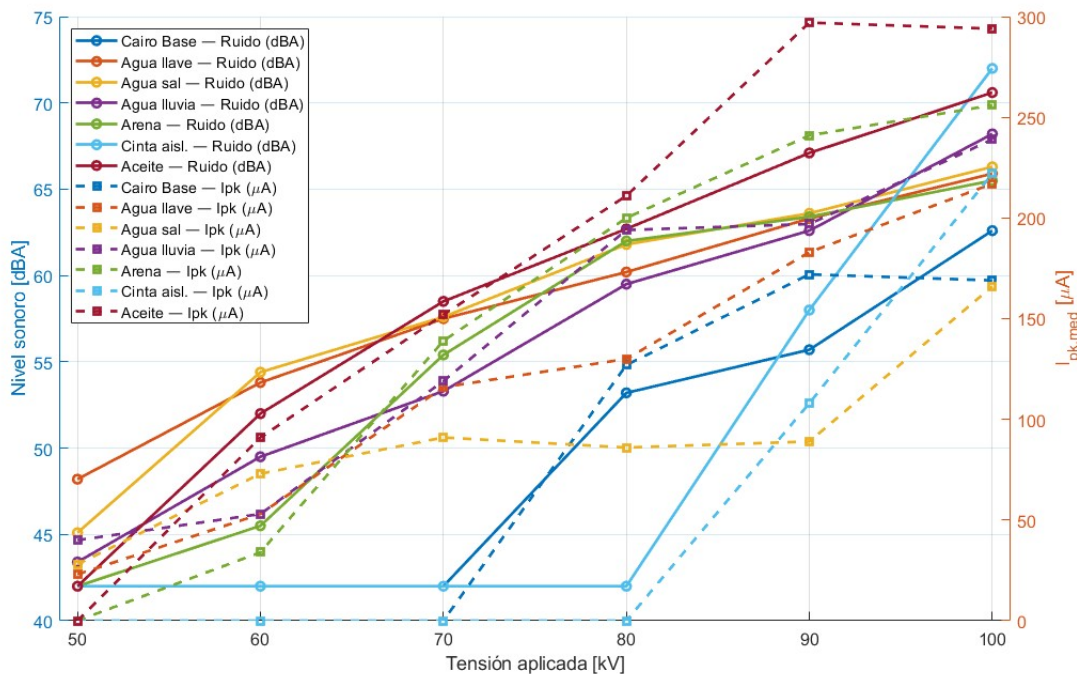


Figura 5.35: Representación de nivel sonoro y corriente *peak* para las diferentes condiciones superficiales en las distintas tensiones de operación, (elaboración propia).

A partir de la figura 5.35, se observa que el ruido audible (L_A) y la corriente *peak* (I_{pk}) aumentan con la tensión en todas las condiciones superficiales. No obstante, los valores máximos no coinciden: a 100 kV, el Aceite registra la mayor corriente (300 μA), mientras que la Cinta aislante genera el nivel de ruido más alto (72 dBA). En el extremo opuesto, el Agua con sal presenta la menor corriente entre los recubrimientos, pero el ruido más bajo sigue correspondiendo al Cairo Base. Se identifican casos específicos de desacople donde la corriente disminuye pero el ruido continúa subiendo, como ocurre en el Aceite y en el Cairo Base entre los 90 kV y 100 kV. Estos resultados permiten comprender que una alta corriente *peak* no

desencadena necesariamente un alto ruido audible, ni viceversa; sin embargo, se confirma que siempre que se registra actividad eléctrica de corona, el ruido medido supera el nivel ambiente de 42 dBA.

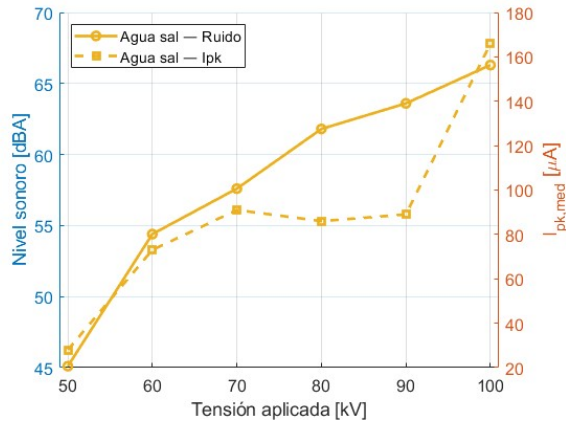


Figura 5.36: Variación de la corriente *peak* y el ruido audible para la condición superficial de Agua contaminada, (elaboración propia).

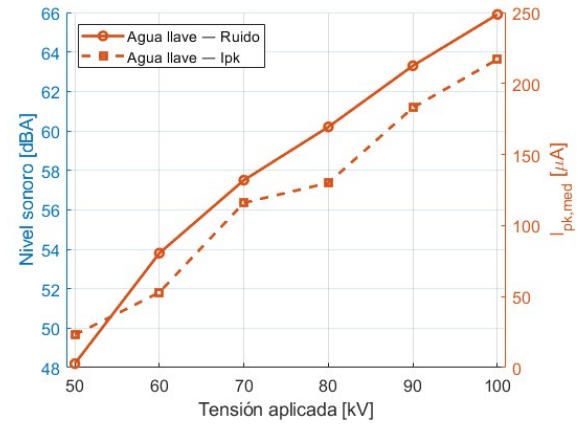


Figura 5.37: Variación de la corriente *peak* y el ruido audible para la condición superficial de Agua de la llave, (elaboración propia).

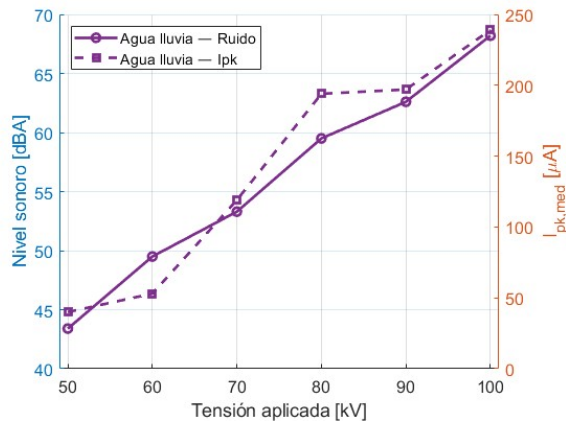


Figura 5.38: Variación de la corriente *peak* y el ruido audible para la condición superficial de Agua lluvia, (elaboración propia).

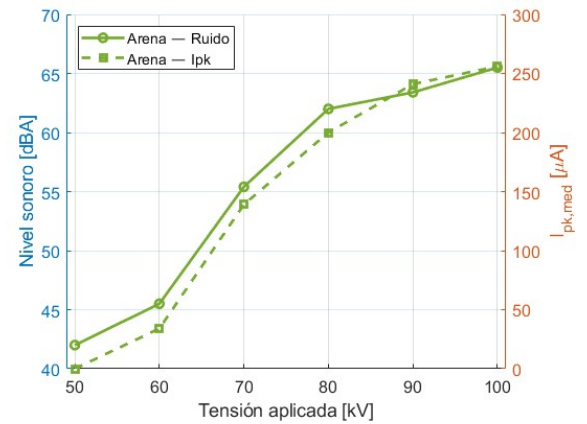


Figura 5.39: Variación de la corriente *peak* y el ruido audible para la condición superficial de Arena, (elaboración propia).

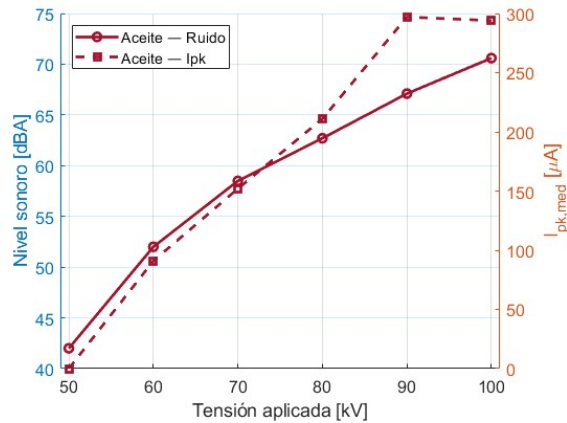


Figura 5.40: Variación de la corriente *peak* y el ruido audible para la condición superficial de Aceite, (elaboración propia).

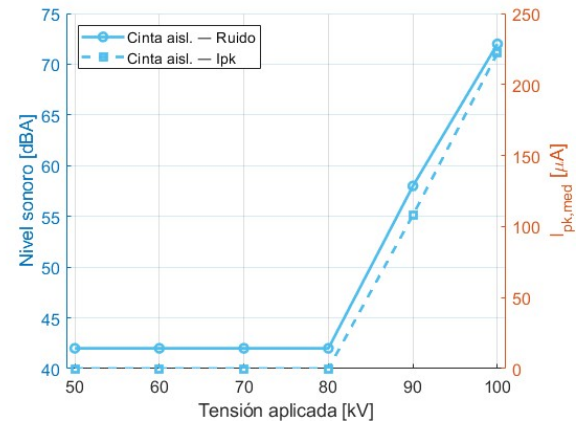


Figura 5.41: Variación de la corriente *peak* y el ruido audible para la condición superficial de Cinta aislante, (elaboración propia).

En las figuras 5.36, 5.37, 5.38, 5.39, 5.40 y 5.41, se pueden observar los cambios en corriente y en ruido para cada condición superficial por separado. Aplicando la ecuación (5.2) se obtiene la variación de la corriente y del ruido audible respecto a su valor en la tensión anterior.

A partir de esto se puede observar que:

- En términos generales, al aumentar la tensión aplicada se incrementan tanto la corriente *peak* I_{pk} como el nivel de ruido audible, aunque la rapidez de este incremento varía según la condición superficial, evidenciando intervalos donde el fenómeno se intensifica con mayor brusquedad. Donde el aumento más grande de corriente lo tuvo la arena $60 \rightarrow 70$ kV con un valor de 308,8 % y el mayor cambio de ruido lo tuvo la cinta aislante entre los $80 \rightarrow 90$ kV con un cambio de 38,1 %.
- La aparición de I_{pk} distinto de cero ocurre a tensiones diferentes dependiendo del recubrimiento/condición, lo que sugiere distintos niveles de susceptibilidad al inicio del efecto corona. La Cinta aislante y el Cairo sin recubrimiento logran retrasar la actividad significativa hasta los 80 kV y 70 kV respectivamente, esto indica superficies más homogéneas o dieléctricas soportan mayor estrés antes de iniciar las descargas.
- Para condiciones como agua (llave/lluvia/sal) y arena, se observan incrementos sostenidos de ruido con la tensión, junto con aumentos relevantes de I_{pk} en rangos específicos, lo que es consistente con una intensificación progresiva del régimen de descarga al incrementar la tensión.
- En algunas transiciones puede observarse un desacople entre ambas magnitudes, donde el ruido aumenta mientras I_{pk} se mantiene o cambia levemente. Esto indica que la relación entre emisión acústica e intensidad *peak* de corriente no es estrictamente proporcional en todos los regímenes, y puede verse influida por la naturaleza de la descarga, la dispersión del proceso y la forma de cuantificación de I_{pk} .

- La condición de cinta aislante presenta un comportamiento particular: el ruido se mantiene en el nivel de fondo (42 dBA) hasta los 80 kV, funcionando como una barrera dieléctrica efectiva. Sin embargo, sobre los 90 kV se observa una transición abrupta hacia niveles críticos (72 dBA a 100 kV) provocada por la ionización de burbujas de aire atrapadas entre las capas de la cinta, las cuales actúan como focos internos de efecto corona.

En síntesis, el análisis incremental por condición superficial muestra que, al igual que para las diferentes topologías de conductores, una variación de la corriente peak (I_{pk}), sea positiva o negativa, no conlleva un cambio proporcional ni en el mismo sentido para el ruido audible. Esto se explica porque la emisión sonora mantiene una correlación más consistente con el incremento de la tensión aplicada, aumentando de forma sostenida incluso cuando la magnitud eléctrica presenta leves descensos en tramos específicos. Sin embargo, la aparición de corriente asociada a corona garantiza la presencia de ruido audible en el conductor, tendiendo a situarse por sobre el nivel ambiente, lo que ratifica la conexión entre ambos parámetros.

Capítulo 6

Conclusiones

La presente memoria tuvo como objetivo cuantificar el efecto corona en diferentes configuraciones de conductores y condiciones superficiales (recubrimientos), a partir de mediciones de corriente de corona y ruido audible bajo excitación en tensión alterna (AC). A partir del análisis de los resultados obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones:

- Se realizaron mediciones sobre cinco conductores distintos y siete recubrimientos, obteniendo registros de corriente de corona mediante la jaula corona y de ruido audible, según el procedimiento experimental descrito en el capítulo 3.
- Sobre las formas de onda de la corriente, las mediciones permiten distinguir dos familias de pulsos de corriente de corona (lentos y rápidos), todos compatibles con pulsos de Trichel de polaridad negativa, cuya aparición depende principalmente del estado superficial del conductor y de la presencia de recubrimientos.
- El análisis de i_{peak} se confirma que la geometría y la homogeneidad superficial dominan la mitigación del corona. Los conductores de aluminio de gran diámetro y en buena condición superficial minimizaron la corriente, mientras que el cobre y los daños en el conductor la intensificaron. Similarmente, los recubrimientos como arena, aceite, agua lluvia y agua de la llave elevaron los *peak* de corriente debido a la concentración de campo, salvo el agua con porcentaje de contaminación salina que atenuó la señal por homogeneización conductiva. Finalmente, la cinta aislante fue eficaz solo hasta 90 kV; al superar este umbral, el apantallamiento se anuló por la activación de defectos internos, donde microburbujas atrapadas entre capas sufren ruptura dieléctrica, generando descargas parciales que intensifican la corriente.
- Sobre el análisis a partir del modelo cromático, a partir *Set 1* y del *Set 2*, se muestra que los pulsos de corriente de corona se concentran en un dominio espectral acotado, con frecuencias cromáticas centrales del orden de 0,3–1,1 MHz y anchos cromáticos B inferiores a 3 MHz, lo que define un

rango característico de operación del fenómeno en las condiciones de ensayo. Dentro de este dominio se verifica, de manera consistente, una relación inversa entre la energía cromática E_b y el ancho cromático B : al aumentar la tensión aplicada, la energía de los pulsos crece y el espectro tiende a concentrarse, reduciendo la dispersión frecuencial.

- Respecto al ruido audible, los resultados determinan que un mayor diámetro, una superficie íntegra y la ausencia de recubrimientos constituyen la configuración óptima para minimizar la emisión acústica. Por el contrario, la reducción del radio, el deterioro del conductor o la presencia de agentes que intensifiquen el gradiente de campo —como la humedad, partículas sólidas o la degradación de la homogeneidad dieléctrica— adelantan el inicio del fenómeno y elevan significativamente los niveles de RA, especialmente al superar los 90 kV.
- Respecto a la visualización conjunta de la corriente *peak* y el ruido audible, tanto en conductores como en condiciones superficiales se observa una tendencia general de aumento con la tensión aplicada. No obstante, la relación no es estrictamente proporcional: el mayor I_{pk} no siempre coincide con el mayor ruido y existen intervalos donde el ruido aumenta aun cuando I_{pk} disminuye levemente. En síntesis, una alta corriente *peak* no implica necesariamente un alto ruido, ni viceversa; sin embargo, cuando se registra corriente asociada a corona, el ruido tiende a superar el nivel ambiente.

La alternativa más eficiente para mitigar el efecto corona, tanto en términos de *peaks* de corriente como de ruido audible, es el empleo de conductores de aluminio de gran diámetro en estado íntegro y sin recubrimientos, ya que esta configuración maximiza la homogeneidad superficial y evita la intensificación del gradiente superficial del conductor que dispara las descargas. Aunque la cinta aislante mostró beneficios bajo los 80 kV al actuar como una barrera dieléctrica, este comportamiento constituye un resultado aislado de laboratorio; al incrementar la tensión, la formación de microburbujas de aire entre capas termina por intensificar la corriente medida y la emisión acústica por encima del conductor base.

6.1. Trabajos futuros

Como trabajos futuros o líneas de investigación derivadas de esta memoria, se proponen las siguientes:

- Realizar una memoria destinada a garantizar medir correctamente efecto corona tanto para una excitación AC, como DC.
- Repetir los ensayos realizados en esta memoria utilizando una excitación en tensión continua, con el fin de comparar los resultados obtenidos en términos de corriente de corona y ruido audible frente a los registrados bajo excitación en AC.
- Realizar mediciones de pérdidas por corona, como se describe en [9, 13], mediante el uso de un puente de Schering, dado que se requiere un instrumento capaz de medir factores de potencia muy bajos.
- Estudiar experimentalmente el efecto del agua sobre el conductor siguiendo la metodología propuesta en [17], comparando el comportamiento de conductores con y sin recubrimientos hidrofóbicos, tanto en corriente de corona como en ruido audible.
- Ampliar el análisis comparativo de ruido audible a un mayor número de conductores, incorporando una gama más amplia de diámetros, materiales y condiciones superficiales, con el fin de establecer criterios de selección más generales.
- Realizar un estudio del efecto corona bajo condiciones controladas de presión y temperatura, modificando estos parámetros en la vecindad del conductor, con el objetivo de evaluar cuantitativamente su impacto sobre la iniciación y el desarrollo del fenómeno.

Bibliografía

- [1] Turan Gönen. *Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design*, chapter 8, pages 515–536. CRC Press, 3 edition, 2014.
- [2] P. Sarma Maruvada. *Corona and Gap Discharge Phenomena*, chapter 8, pages 8–01–8–40. EPRI, Palo Alto, CA, 3 edition, 2005. Report No. 1011974.
- [3] 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, 2011.
- [4] Alvaro Antonio Bozo Guajardo. Diseño y construcción de una jaula corona para generación y medición de fenómenos asociados al efecto corona en líneas de transmisión, Mayo 2025. Profesor guía: Dr. Johny Montaña Chaparro (UTFSM); Profesor Correferente: Dr. Roger Schürch Brandt (UTFSM).
- [5] Nelson Morales Osorio. Fenómeno corona en líneas aéreas. Manuscrito, 2006. Documento interno, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [6] Dib Djalel and Daas Abdelhakim. Influence of atmospheric conditions on the corona effect in hv power systems. In *2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, pages 628–634, 2014.
- [7] TECSA Querétaro. Efecto corona: definición, causas y prevención. Entrada de blog de TECSA Querétaro.
- [8] NASA Space Place. La corona del sol, 2023. Sitio educativo de la NASA (Space Place), contenido en español.
- [9] Mokwape Johannah Lekganyane. A study of hvdc transmission line audible noise and corona loss in an indoor corona cage. Master of science in engineering (electrical), University of KwaZulu-Natal, Durban, South Africa, July 2007. Supervisor: Prof. N. M. Ijumba; Co-supervisor: Adj. Prof. A. C. Britten.

- [10] Peyman Dordizadeh, Kazimierz Adamiak, and G. S. Peter Castle. Experimental study of the characteristics of trichel pulses in the needle–plane negative corona discharge in atmospheric air. *Journal of Electrostatics*, 88:49–54, 2017. Experimental investigation of Trichel pulse characteristics in negative corona discharge under atmospheric pressure.
- [11] G. W. Trichel. The mechanism of the positive point-to-plane corona in air at atmospheric pressure. *Physical Review*, 55(4):382–390, February 1939. Seminal study describing the fluctuating current behavior in corona discharges, precursor to the identification of Trichel pulses.
- [12] Ghasem Nourirad, Chandima Gomes, and Mohd Zainal Abidin Ab Kadir. Corona losses: Issues and solutions. In *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, pages 405–410, 2013.
- [13] P. Sarma Maruvada. *Corona Loss and Ozone*, chapter 11, pages 11–01–11–23. EPRI, Palo Alto, CA, 3 edition, 2005. Report No. 1011974.
- [14] M. S. Naidu and V. Kamaraju. *High Voltage Engineering*. McGraw Hill Education (India) Private Limited, 5th edition, 2013.
- [15] Rodrigo Fernando Sabaj 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, 2015. Profesor guía: Ernesto Bianchi Souter; Comisión: Nelson Morales Osorio, Rodrigo Palma Behnke.
- [16] J. Duncan Glover, Thomas J. Overbye, and Mulukutla S. Sarma. *Power System Analysis and Design*. Cengage Learning, 6 edition, 2016.
- [17] O. Pischler and U. Schichler. Influence of hydrophilic conductor surface treatments on ohl audible noise. In *2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, pages 78–81, 2018.
- [18] Iec/ts 60815-1: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – part 1: Definitions, information and general principles. Technical Specification IEC/TS 60815-1, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, October 2008. ICS 29.080.10.
- [19] Manuel S. Alvarez-Alvarado, Christian A. Apolo-Tinoco, and Washington Velasquez. Corona discharge impact suppression in ultra high voltage using a novel mechanism with dielectric oil. *IEEE Access*, 10:63137–63146, June 2022.
- [20] Yuze Jiang, Qiying Li, Xuekai Zhang, Diwen Jiang, Shiqiang Liu, Bangfa Peng, and Jie Li. Research on corona discharge suppression of high-voltage direct-current transmission lines based on dielectric-film-covered conductor. *Plasma Science and Technology*, 23(2):025505, 2021.

- [21] Jorge Alfredo Ardila-Rey, Johny Montaña, Bruno Albuquerque de Castro, Roger Schurch, José Alfredo Covolan Ulson, Firdaus Muhammad-Sukki, and Nurul Aini Bani. A comparison of inductive sensors in the characterization of partial discharges and electrical noise using the chromatic technique. *Sensors*, 18(4):1108, 2018.
- [22] Open-Meteo.com. Open-meteo archive api query (pressure_msl, pressure_msl_mean) near valparaíso, chile. https://archive-api.open-meteo.com/v1/archive?latitude=-33.075573&longitude=-71.64618&start_date=2025-10-17&end_date=2025-10-28&hourly=pressure_msl&daily=pressure_msl_mean&timezone=America%2FSantiago.
Accedido: 2025-12-31. Coordenadas: lat=-33.075573, lon=-71.64618.
- [23] Qi Li, Simon M. Rowland, Iain Dupere, and Richard S. Morris. The impact of water droplet vibration on corona inception on conductors under 50 hz ac fields. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(5):2428–2436, 2018.

Anexos

Partes de la jaula corona y set up



Conjunto acollador, aislador y anillos (Elaboración propia).



Anillo corona desmontable (Elaboración propia).



Tubo contenedor de conductor mas anillo corona vista de frente (Elaboración propia).



Tubo contenedor de conductor mas anillo corona vista lateral (Elaboración propia).



Codo de PVC, unión entre el conductor y el elevador de tensión (Elaboración propia).



Codo de PVC, unión entre elevador de tensión, el conductor y el divisor capacitivo (Elaboración propia).



Codo de PVC, unión entre elevador de tensión, el conductor y el divisor capacitivo (Elaboración propia).



Tapa de filamento 3d recubierta con aluminio (Elaboración propia).

Resultados

Corriente de corona

Resumen de parámetros temporales y de corriente pick de un pulso de corona para los distintos conductores y recubrimientos.

Conductor / recubrimiento	I_{pick} [μA]	t_{in} [μs]	t_{co} [μs]	t_e [μs]
Cairo	165,62	4,30	16,20	55,50
Alliance	225,00	3,02	13,60	22,92
Flint	412,50	7,00	18,60	68,65
Coreopsis	250,00	3,38	13,86	22,98
Cobre	500,00	7,05	18,50	68,45
Arena	256,25	3,04	13,50	23,38
Lluvia	240,60	3,20	13,56	23,16
Sal	165,60	6,10	17,80	35,50
Llave	218,75	3,06	13,42	22,88
Aceite	293,75	3,04	13,54	21,98
Cinta	225,00	2,96	13,58	22,84

Tablas de valores de corriente *peak*

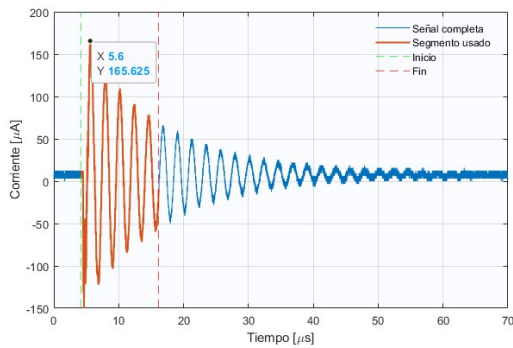
Tabla 6.1: Mediana de corriente *peak* de corona para distintas topologías de conductores a diferentes tensiones.

Conductor	[kV]	$I_{pk,med}$ [μA]
Alliance	60	78
Coreopsis		24
Alliance	70	149
Cobre		92
Coreopsis	80	42
Alliance		134
Cairo estado normal		127
Cobre		121
Coreopsis	90	88
Alliance		191
Cairo estado normal		172
Cobre		341
Coreopsis		125
Flint	100	133
Alliance		223
Cairo estado normal		169
Cobre		500
Coreopsis		252
Flint		413

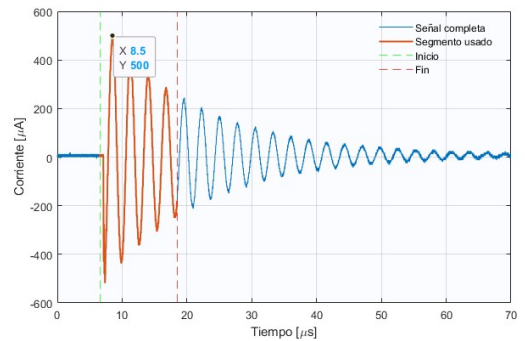
Tabla 6.2: Mediana de corriente *peak* de corona para Cairo con distintos recubrimientos a diferentes tensiones.

Conductor	[kV]	$I_{pk,med}$ [μA]
Cairo con agua con sal	50	28
Cairo con agua de la llave		23
Cairo con agua de lluvia		40
Cairo con aceite	60	91
Cairo con agua con sal		73
Cairo con agua de la llave		53
Cairo con agua de lluvia		53
Cairo con arena		34
Cairo con aceite	70	152
Cairo con agua con sal		91
Cairo con agua de la llave		116
Cairo con agua de lluvia		119
Cairo con arena		139
Cairo con aceite	80	211
Cairo con agua con sal		86
Cairo con agua de la llave		130
Cairo con agua de lluvia		194
Cairo con arena		200
Cairo estado normal		127
Cairo con aceite	90	297
Cairo con agua con sal		89
Cairo con agua de la llave		183
Cairo con agua de lluvia		197
Cairo con arena		241
Cairo con cinta aislante		108
Cairo estado normal		172
Cairo con aceite	100	294
Cairo con agua con sal		166
Cairo con agua de la llave		217
Cairo con agua de lluvia		239
Cairo con arena		256
Cairo con cinta aislante		222
Cairo estado normal		169

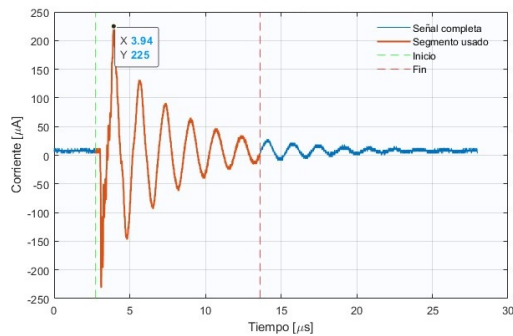
Formas de onda de corriente para las diferentes topologías de conductores.



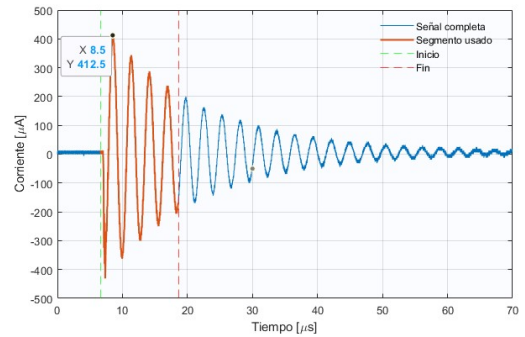
Forma de onda de corriente para conductor Cairo 19.88 mm a 100 kV, (Elaboración propia).



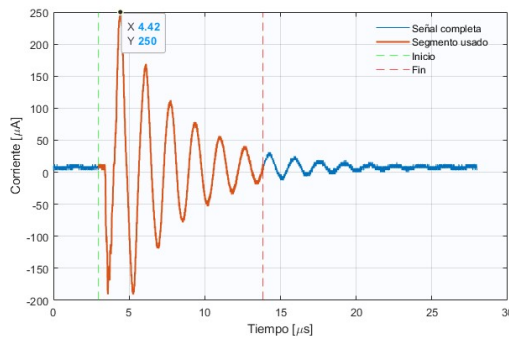
Forma de onda de corriente para conductor Cobre 20.6 mm a 100 kV, (Elaboración propia).



Forma de onda de corriente para conductor Alliance 14.33 mm a 100 kV, (Elaboración propia).

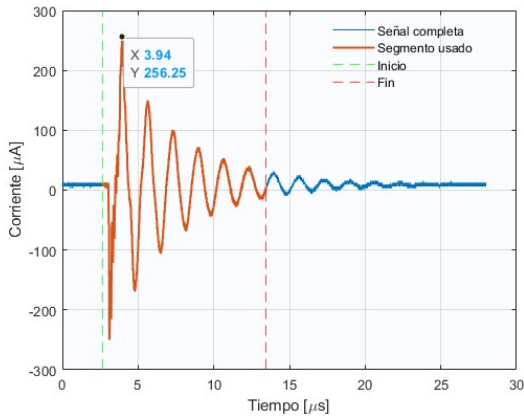


Forma de onda de corriente para conductor Flint 25.2 mm a 100 kV, (Elaboración propia).

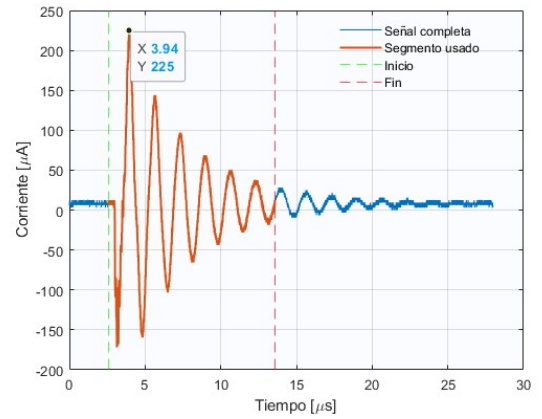


Forma de onda de corriente para conductor Coreopsis 36.91 mm a 100 kV, (Elaboración propia).

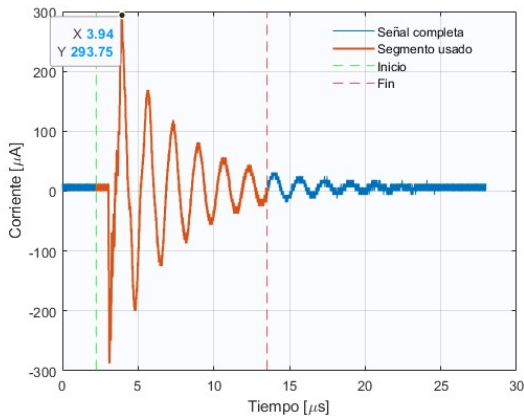
Formas de onda de corriente para las diferentes condiciones superficiales en el conductor



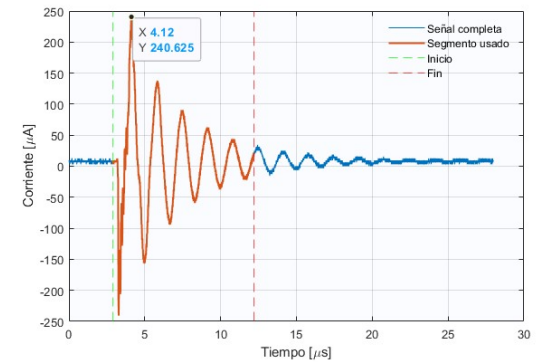
Forma de onda de corriente para conductor cubierto con arena a 100 kV,(Elaboración propia).



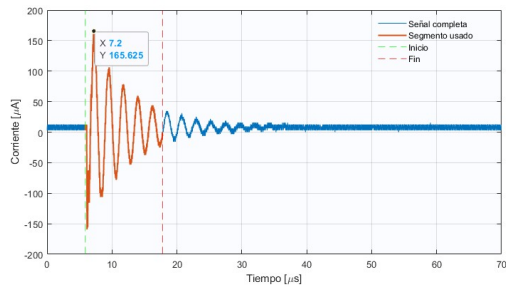
Forma de onda de corriente para conductor cubierto con cinta aislante a 100 kV,(Elaboración propia).



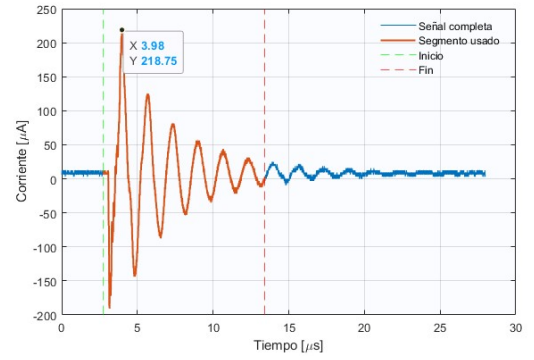
Forma de onda de corriente para conductor cubierto con aceite a 100 kV,(Elaboración propia).



Forma de onda de corriente para conductor cubierto con agua de lluvia a 100 kV, (Elaboración propia).



Forma de onda de corriente para conductor cubierto con agua con sal a 100 kV, (Elaboración propia).



Forma de onda de corriente para conductor cubierto con agua de la llave a 100 kV, (Elaboración propia).