



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

MODELACIÓN DEL EFECTO CORONA EN UN CONDUCTOR

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: ALEXIS JOSUÉ LABANDA GARCÍA
SANTIAGO JAVIER REINOSO GALLARDO

TUTOR: ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE

Cuenca - Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Alexis Josué Labanda García con documento de identificación N° 0705757177 y Santiago Javier Reinoso Gallardo con documento de identificación N° 0302300736; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 12 de marzo del 2025

Atentamente,



Alexis Josué Labanda García
0705757177



Santiago Javier Reinoso Gallardo
0302300736

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Alexis Josué Labanda García con documento de identificación N° 0705757177 y Santiago Javier Reinoso Gallardo con documento de identificación N° 0302300736, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: Modelación del efecto corona en un conductor, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 12 de marzo del 2025

Atentamente,



Alexis Josué Labanda García
0705757177



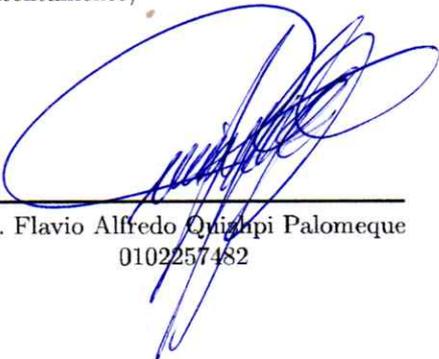
Santiago Javier Reinoso Gallardo
0302300736

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque con documento de identificación N° 0102257428, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MODELACIÓN DEL EFECTO CORONA EN UN CONDUCTOR, realizado por Alexis Josué Labanda García con documento de identificación N° 0705757177 y por Santiago Javier Reinoso Gallardo con documento de identificación N° 0302300736, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 12 de marzo del 2025

Atentamente,



Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque
0102257482

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana por la enseñanza en nuestra formación profesional y por la ayuda otorgada, la cual nos permitió realizar este proyecto investigativo dentro del establecimiento y de sus laboratorios. Sin su apoyo, este trabajo no hubiera sido posible.

Expresamos nuestro profundo agradecimiento al Ingeniero Flavio Quizhpi por la confianza, motivación y el apoyo brindado para desarrollar el tema de titulación. Su guía fue fundamental para el éxito de este proyecto.

Por último, agradecemos a todos nuestros familiares y amigos que estuvieron presentes en los momentos difíciles, brindándonos su apoyo incondicional para seguir adelante y culminar con nuestra tesis. Este logro es también suyo.

Con gratitud y humildad, dedicamos este trabajo a todos quienes hicieron posible su realización.

DEDICATORIA

A mis padres, por su esfuerzo y apoyo incondicional para que pudiera estudiar y convertirme en un profesional; a mis amigos, por acompañarme en este camino lleno de aprendizajes y momentos inolvidables. Este logro es también el resultado de su cariño y motivación, y por eso les dedico con gratitud este trabajo.

Santiago Javier Reinoso Gallardo

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por guiarme y darme fortaleza; a mis padres, por su amor incondicional, sacrificios y apoyo constante que me permitieron llegar hasta aquí; a mis hermanos, por su comprensión y ánimo en cada etapa de este proceso; y a mis amigos, quienes con su compañía y momentos compartidos hicieron más llevadera esta travesía. Este logro no habría sido posible sin todos ustedes, y les estaré eternamente agradecido por ser parte fundamental de mi crecimiento personal y profesional.

Alexis Josué Labanda García

RESUMEN

Este trabajo de investigación presenta el desarrollo y validación de un modelo para el efecto corona, un fenómeno que genera pérdidas energéticas, interferencias electromagnéticas y deterioro en conductores eléctricos. A pesar de los avances en el análisis del efecto corona, su naturaleza estocástica y los complejos procesos de ionización involucrados representan un desafío para su modelamiento preciso.

La metodología emplea dos herramientas computacionales complementarias: MATLAB para el procesamiento, clasificación y modelamiento estadístico de datos, y ATP-EMTP para la simulación de transitorios electromagnéticos en sistemas eléctricos. El modelo propuesto caracteriza el efecto corona en un conductor considerando tres variables principales: temperatura, humedad y voltaje.

La validación del modelo se realiza mediante un análisis comparativo entre los datos experimentales obtenidos en laboratorio y los resultados de las simulaciones en ATP. Este proceso permite evaluar la precisión, confiabilidad y aplicabilidad del modelo en condiciones reales.

Finalmente, el documento presenta conclusiones relevantes sobre el comportamiento del efecto corona y proporciona recomendaciones para futuros estudios, orientados a mejorar la precisión y generalización del modelo propuesto.

Palabras clave: Efecto corona, Modelamiento matemático, Simulación electromagnética.

ABSTRACT

This research work presents the development and validation of a model for the corona effect, a phenomenon that generates energy losses, electromagnetic interference and deterioration in electrical conductors. Despite the advances in the analysis of the corona effect, its stochastic nature and the complex ionization processes involved represent a challenge for its accurate modeling.

The methodology employs two complementary computational tools: MATLAB for data processing, classification and statistical modeling, and ATP-EMTP for the simulation of electromagnetic transients in electrical systems. The proposed model characterizes the corona effect in a conductor considering three main variables: temperature, humidity and voltage.

The validation of the model is performed through a comparative analysis between the experimental data obtained in the laboratory and the results of the ATP simulations. This process allows evaluating the accuracy, reliability and applicability of the model in real conditions.

Finally, the paper presents relevant conclusions on the behavior of the corona effect and provides recommendations for future studies aimed at improving the accuracy and generalization of the proposed model.

Key words: Corona effect, Mathematical modeling, Electromagnetic simulation.

ÍNDICE

1	ANÁLISIS DEL EFECTO CORONA Y MODELOS QUE DESCRIBEN SU COMPORTAMIENTO EN UN CONDUCTOR	2
1.1	Variables que influyen en el efecto corona	3
1.1.1	Gradiente Crítico	3
1.1.2	Superficie del conductor	4
1.1.3	Condiciones ambientales	4
1.1.4	Polaridad	6
1.1.5	Tensión de Incepción	6
1.2	Función Heaviside y sus aplicaciones	7
1.3	Funciones de Densidad de Probabilidad	8
2	MODELO DEL EFECTO CORONA DESARROLLADO	9
2.1	Circuito para obtención de datos	9
2.2	Análisis de datos obtenidos y propuesta de un modelo	10
2.2.1	Modelo Propuesto	11
2.3	Parametrización de los elementos del modelo propuesto	12
2.3.1	Ajuste de los parámetros sinusoidales	12
2.3.2	Ajuste de los parámetros impulsivos	15
2.3.2.1	Número de Picos	18
2.3.3	Ajuste de la componente estadística	19
3	SIMULACIÓN DEL EFECTO CORONA	20
3.1	Circuito para obtención del efecto corona	20
3.1.1	Componente senoidal	20
3.1.2	Componente impulsiva	20
3.1.3	Componente estadística	22
4	VALIDACIÓN DE RESULTADOS	23
4.1	Método para validar	23
4.2	Resultados	23
4.2.1	Ensayo de Precipitación en Cámara de Lluvia	32
4.3	Análisis de Resultados	34

5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
5.1	Conclusiones	36
5.2	Recomendaciones	37
ANEXOS		41
A	Circuito de Laboratorio	41
B	Resultado parámetros MATLAB	43
C	Programación modelo MATLAB	45

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Circuito para detección de Descargas Parciales [10].	9
2.2	Jaula Corona.	10
2.3	Señal de muestra.	10
2.4	Componente sinusoidal de la corriente filtrada.	13
2.5	A vs Variables experimentales	14
2.6	Detección de picos	16
2.7	B vs Variables experimentales	17
3.1	Modelo propuesto del efecto corona en ATP Draw	22
4.1	Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 21 °C de temperatura y 48% de humedad relativa.	24
4.2	Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 23 °C de temperatura y 38% de humedad relativa.	26
4.3	Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 24 °C de temperatura y 34% de humedad relativa.	28
4.4	Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 25 °C de temperatura y 32% de humedad relativa.	30
4.5	Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 28 °C de temperatura y 32% de humedad relativa.	31
4.6	Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 18.7 °C de temperatura y 78% de humedad relativa.	32
4.7	Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 19.5 °C de temperatura y 72% de humedad relativa.	33
4.8	Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 19.5 °C de temperatura y 72% de humedad relativa.	33
A.1	Circuito experimental	41
A.2	Circuito experimental con calentador eléctrico	42
A.3	Circuito experimental con cámara de lluvia	42
B.1	Histograma picos positivos	43
C.1	Parámetros vs V_{apli}	45
C.2	Parámetros vs T	46

C.3	Parámetros vs H	47
C.4	Matriz de correlación	48

Índice de tablas

1.1	Valores referenciales de m [6].	4
2.1	Coefficientes para B_{pos} y B_{neg}	18
4.1	Validación de Resultados	25
4.2	Validación de Resultados	27
4.3	Validación de Resultados	29
4.4	Validación de Resultados	31
4.5	Validación de Resultados	31
4.6	Validación de Resultados	32
4.7	Validación de Resultados	33
4.8	Validación de Resultados	34
B.1	Resultados parámetros a 21°C	43
B.2	Resultados parámetros a 23°C	43
B.3	Resultados parámetros a 24°C	43
B.4	Resultados parámetros a 25°C	44
B.5	Resultados parámetros a 26°C	44
B.6	Resultados parámetros a 27°C	44
B.7	Resultados parámetros a 28°C	44
C.1	Áreas del Trabajo de Grado	49

INTRODUCCIÓN

La presente tesis se enfoca en la modelación del efecto corona en conductores eléctricos, empleando principios fundamentales de alta tensión y técnicas de simulación computacional. El estudio analiza la caracterización del fenómeno bajo diversas condiciones operativas y ambientales, con el objetivo de desarrollar un modelo validado que permita comprender el comportamiento del efecto corona en un conductor.

El Capítulo 1 presenta una revisión de la literatura existente sobre los modelos matemáticos que describen el comportamiento del efecto corona en un conductor, estableciendo fundamentos teóricos que servirán como base metodológica para el desarrollo de un modelo original.

El Capítulo 2 se enfoca en el desarrollo y la formulación de un modelo matemático basado en el método inductivo. Este capítulo detalla la obtención de los parámetros que conforman el modelo, así como el procedimiento empleado para obtenerlos.

El Capítulo 3 describe la implementación computacional del modelo propuesto mediante herramientas de simulación, detallando los procedimientos de discretización y los parámetros de configuración empleados.

El Capítulo 4 aborda la validación experimental del modelo, incluyendo el análisis de los resultados obtenidos y la cuantificación de errores.

Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones derivadas del análisis de los resultados obtenidos y su comparación con el modelo propuesto, así como las recomendaciones pertinentes.

CAPÍTULO 1

ANÁLISIS DEL EFECTO CORONA Y MODELOS QUE DESCRIBEN SU COMPORTAMIENTO EN UN CONDUCTOR

La corona es una descarga luminosa debido a la ionización del aire que rodea un conductor o electrodo por un gradiente de voltaje que excede cierto valor crítico [1].

El efecto Corona es un fenómeno característico de los sistemas de extra y ultra alta tensión que se manifiesta cuando el potencial de un conductor supera la rigidez dieléctrica del aire circundante. Técnicamente, ocurre a partir de 21.10 kV/cm (valor eficaz RMS) o 29.8 kV/cm (valor pico) en condiciones estándar del aire (760 mm de Hg y 25°C) [2].

El proceso físico fundamental implica el comportamiento de los electrones en condiciones específicas. Normalmente, los electrones viajan a través de materiales metálicos conductores, mientras que el aire actúa como aislante. Sin embargo, bajo condiciones anormales de funcionamiento (como exceso de tensión), algunos electrones abandonan su trayectoria normal en el conductor y saltan al aire. Puesto que el aire es un medio conductor, estos electrones experimentan una fuerte desaceleración en apenas unos centímetros, pasando de altas velocidades hasta detenerse. Este proceso de frenado genera un incremento de temperatura que lleva a los electrones al estado incandescente. La acumulación de millones de estos electrones libres forma un característico anillo luminoso alrededor del conductor, siguiendo la forma de las líneas de tensión asociadas. Dado que los conductores suelen ser cilíndricos, este anillo luminoso adopta una forma de corona [3].

En términos de impacto operativo, aunque las pérdidas en las líneas de transmisión son considerables, la mayor preocupación se centra en la interferencia sobre

las comunicaciones inalámbricas. Con el desarrollo de sistemas de ultra alta tensión, el ruido audible también se ha convertido en una preocupación significativa.

Históricamente, F.W. Peek fue pionero en el estudio de este fenómeno desde 1912 [4] mientras trabajaba en General Electric. En 1929, publicó un libro fundamental sobre efectos dieléctricos en alta tensión, basado en experimentos con líneas de 275 m de longitud y transformadores monofásicos de 200 kV. Sus estudios experimentales abarcaron conductores de diversos calibres, desde varios milímetros hasta una pulgada de diámetro. Posteriormente, investigadores como J.S. Carroll, M.M. Rockwell y W.S. Petersen expandieron estos conocimientos iniciales. En la actualidad, la investigación continúa activamente en laboratorios modernos, utilizando líneas experimentales de varios cientos de kilovoltios [2].

1.1 Variables que influyen en el efecto corona

1.1.1 Gradiente Crítico

Si se desea saber si en un conductor se producirá una descarga corona, uno de los elementos más importantes es conocer el gradiente eléctrico en la superficie del mismo [5]. Especialmente el gradiente crítico o gradiente de iniciación E_v , el cual indica que si en la superficie del conductor se alcanza este gradiente de intensidad del campo eléctrico, se crea un gradiente suficiente en una zona específica para que ocurra la descarga [6]. Este valor de gradiente se puede calcular usando la fórmula de Peek [4].

$$E_v = g_0 \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{R}} \right) \quad (1.1)$$

donde:

g_0 ruptura dieléctrica del aire medido a 25 [°C] y 101.325 [Pa] equivalente a 29.8 $\left[\frac{kV}{cm} \right]$

R radio del conductor en cm .

1.1.2 Superficie del conductor

La fórmula anterior se presenta para conductores de superficie lisa ideales. Sin embargo, en la práctica, los conductores exhiben deformaciones mecánicas. Estas irregularidades en la superficie provocan la concentración de cargas eléctricas, lo cual conlleva a que el valor del gradiente crítico sea ligeramente inferior al de un conductor ideal. Debido a este fenómeno, es conveniente la utilización de un factor de corrección m , denominado coeficiente de estado de superficie, el cual adquiere los siguientes valores para un conductor:

m	Estado conductor
1,00	Liso e ideal
0,95	Cableado, nuevo y limpio
entre 0,7 y 0,8	Cableado y envejecido
entre 0,5 y 0,7	Tratado deficientemente
menor a 0,6	Bajo lluvia, nuevo o envejecido

Tabla 1.1: Valores referenciales de m [6].

Con esta corrección la fórmula de Peek adquiere la siguiente forma:

$$E_v = g_0 m \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{R}} \right) \quad (1.2)$$

1.1.3 Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales juegan un papel crucial en la ocurrencia y magnitud del efecto corona. A continuación, se analizan los factores ambientales más relevantes y su impacto en este fenómeno.

1. Temperatura

A temperaturas más elevadas, las moléculas de gas en el aire poseen una mayor energía cinética traslacional promedio [6]. Este aumento en la energía cinética de las partículas facilita la ionización por impacto de las moléculas circundantes durante las colisiones, reduciendo así la rigidez dieléctrica intrínseca del gas [7].

2. Presión

Un aumento en la presión del gas conlleva un incremento en la densidad molecular dentro de un volumen determinado [6]. Esta mayor concentración de

partículas reduce el recorrido libre medio de los electrones, dificultando que alcancen energías cinéticas suficientemente elevadas para provocar ionizaciones adicionales durante los procesos de colisión [7]. En consecuencia, se requiere un campo eléctrico más intenso para iniciar la ruptura dieléctrica, incrementando la rigidez dieléctrica del gas.

3. Humedad

En condiciones de alta humedad relativa, se presenta una mayor concentración de moléculas de agua (vapor de agua) en la mezcla gaseosa. Debido a su naturaleza polar, con una distribución asimétrica de cargas eléctricas, las moléculas de agua exhiben una mayor susceptibilidad a la ionización en comparación con las moléculas no polares como el nitrógeno y el oxígeno [6]. En presencia de un campo eléctrico intenso, las moléculas de agua tienden a orientarse favoreciendo la disociación y la liberación de electrones, formando iones positivos y negativos. Los electrones liberados pueden entonces adquirir suficiente energía cinética para ionizar moléculas adyacentes, desencadenando una reacción en cadena conocida como ruptura por efluvios sucesivos, disminuyendo así la rigidez dieléctrica efectiva del gas [7].

4. Densidad

La densidad del gas es directamente proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura absoluta, según la ecuación de estado de los gases ideales [6]. Por lo tanto, un gas de mayor densidad, ya sea por un aumento en la presión o una disminución en la temperatura, exhibirá una mayor concentración molecular por unidad de volumen, análogo al caso de presiones elevadas, lo que conlleva un incremento en la rigidez dieléctrica [7].

5. Altitud

La altitud influye en la presión atmosférica de manera inversamente proporcional, de acuerdo con el modelo de atmósfera estándar [6]. A medida que se incrementa la altitud, la presión atmosférica disminuye, provocando una reducción en la densidad del gas circundante y, en consecuencia, una disminución en su rigidez dieléctrica [7].

Cuando se tiene en cuenta estos factores ambientales se calcula la densidad relativa del aire de la siguiente forma:

$$\delta = \frac{3.92P}{(T + 273)} \quad (1.3)$$

donde:

P presión atmosférica en Pa .

T temperatura en $^{\circ}C$.

Entonces, el valor del gradiente crítico que tiene en cuenta el estado del conductor y las condiciones ambientales es [6]:

$$E_v = 31m\delta \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta R}} \right) \quad (1.4)$$

1.1.4 Polaridad

La polaridad de la corona se refiere al comportamiento diferencial que exhibe la descarga corona dependiendo de si el conductor está cargado positiva o negativamente.

En el caso de la corona positiva, el gradiente crítico es más alto en comparación con la corona negativa. Por otro lado, para la corona negativa, el gradiente crítico es menor que para la corona positiva bajo las mismas condiciones. Este fenómeno ocurre principalmente debido a la diferencia en la movilidad de los electrones y los iones positivos en el aire. Los electrones tienen una mayor movilidad que los iones positivos, lo que facilita la formación de la corona negativa y su mayor intensidad.

Teniendo en cuenta esta diferencia, se debe utilizar un factor f , conocido como factor de polaridad de voltaje, cuyo valor es 1 para la corona negativa y 0.5 para la corona positiva. Por lo tanto, la fórmula de Peek con esta corrección es [5]:

$$E_v = 31mf\delta \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta R}} \right) \quad (1.5)$$

1.1.5 Tensión de Incepción

La tensión crítica o de incepción corresponde al valor umbral en el cual se originan las pérdidas por ionización en el aire. Este fenómeno se representa mediante la fórmula

[4]:

$$U_o = E_v R \ln \left(\frac{2h}{R} \right) \quad (1.6)$$

donde:

h altura respecto de tierra en *cm*.

1.2 Función Heaviside y sus aplicaciones

La función escalón unitario o función de Heaviside describe cambios instantáneos en sistemas dinámicos [8]. Su definición matemática es:

$$H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.7)$$

Para desplazamientos temporales, donde el cambio ocurre en $t = a$, la función se define como:

$$H(t - a) = \begin{cases} 0, & t < a \\ 1, & t > a \end{cases} \quad (1.8)$$

El pulso rectangular, que describe fenómenos con tiempos definidos de inicio (a) y finalización (b), se expresa mediante:

$$H(t) = u(t - a) - u(t - b) \quad (1.9)$$

Esta última expresión genera una señal que permanece activa únicamente durante el intervalo $[a, b]$.

1.3 Funciones de Densidad de Probabilidad

Los fenómenos aleatorios, si bien no permiten una modelación determinística, pueden analizarse mediante funciones de probabilidad y estadística. La función de densidad de probabilidad (FDP) constituye una herramienta fundamental para la caracterización de estos fenómenos.

Sea X una variable aleatoria continua que toma valores en un conjunto infinito. La función de densidad de probabilidad $f(x)$ se define como [9]:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx \quad (1.10)$$

Esta función debe satisfacer las siguientes propiedades:

$$f(x) \geq 0, \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad (1.11)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (1.12)$$

CAPÍTULO 2

MODELO DEL EFECTO CORONA DESARROLLADO

2.1 Circuito para obtención de datos

En el Capítulo 1 se estableció que el efecto corona se manifiesta al alcanzar un voltaje crítico, denominado voltaje de inyección. Para el desarrollo del modelo propuesto, la primera etapa consistió en la determinación analítica de este voltaje umbral, considerando los parámetros físicos y ambientales previamente descritos. Posteriormente, se procedió a la adquisición experimental de las formas de onda tanto de voltaje como de corriente mediante un circuito de detección de descargas parciales. El sistema de medición implementado se basó en la configuración propuesta por Quizphi et al. [10], cuyo diagrama esquemático se presenta a continuación:

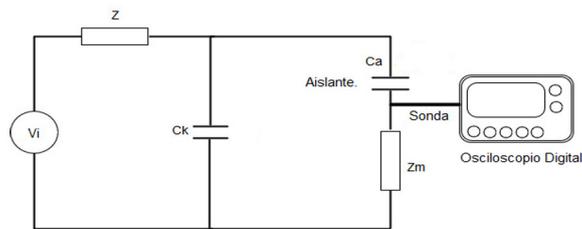


Figura 2.1: Circuito para detección de Descargas Parciales [10].

El esquema evalúa descargas parciales en aisladores, aplicación no correspondiente al presente caso de estudio. El equipo utilizado consiste en una jaula corona (figura A.3). Para proteger el osciloscopio contra posibles corrientes elevadas, se implementa una resistencia limitadora adicional de $10\text{ M}\Omega$.

Para la variación de temperatura, se utilizó un calentador eléctrico, el cual permitió aumentar la temperatura del espacio del laboratorio y, simultáneamente, reducir la humedad relativa.



Figura 2.2: Jaula Corona.

2.2 Análisis de datos obtenidos y propuesta de un modelo

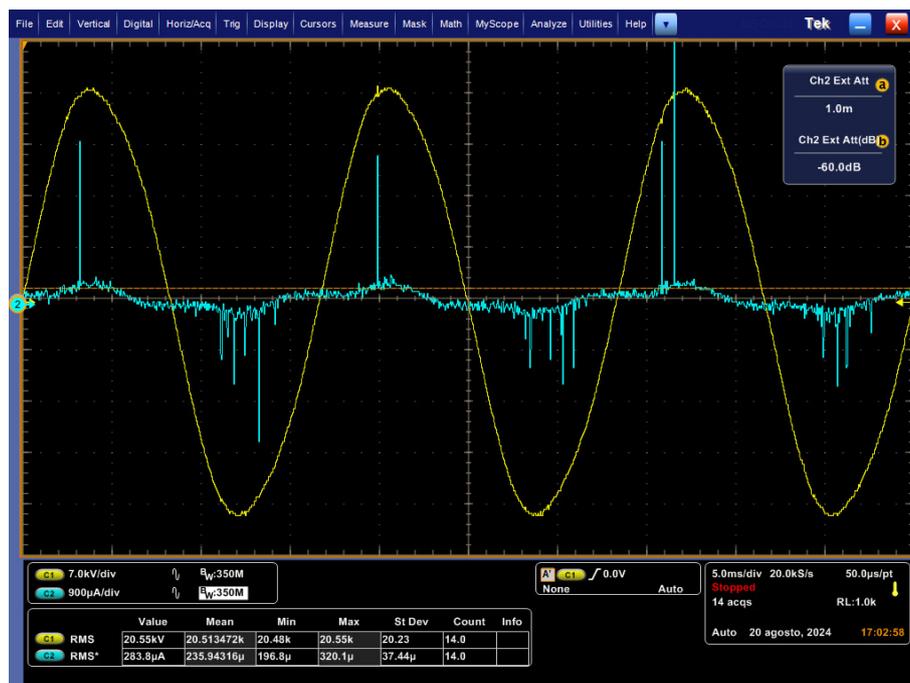


Figura 2.3: Señal de muestra.

El análisis experimental comprende variaciones de voltaje entre 16 kV y 26 kV, con fluctuaciones de temperatura y humedad relativa en el rango de 21°C a 26°C y 29% a 48% respectivamente. La señal de corriente característica del efecto corona, representada en color celeste en la figura 2.3, exhibe las siguientes propiedades fundamentales:

- La señal presenta una componente senoidal base que define la forma general de la onda.
- Durante el semiciclo positivo se observan picos de alta amplitud con baja frecuencia de ocurrencia.
- El semiciclo negativo manifiesta picos de amplitud media-baja con alta frecuencia de ocurrencia.
- Los picos en ambos semiciclos demuestran un comportamiento aleatorio en su distribución temporal.

La selección de estas variables ambientales para el estudio se fundamenta en su capacidad de control experimental. Como se describe en la sección 1.1.3, si bien existen múltiples factores ambientales como altitud, presión y densidad del aire que influyen en el fenómeno, estos parámetros están determinados por la ubicación geográfica y presentan limitaciones para su modificación controlada.

2.2.1 Modelo Propuesto

De acuerdo a la información analizada anteriormente se propone un modelo matemático que combina una componente senoidal fundamental con una serie de pulsos, representando tanto las descargas positivas como negativas características del efecto corona. Este enfoque permite caracterizar el comportamiento no lineal del fenómeno, incorporando la influencia de variables ambientales como temperatura y humedad en la amplitud de las descargas.

El modelo matemático del efecto corona planteado se expresa mediante:

$$I(t) = A(V_{apli}) \sin(2\pi ft) + \sum \left(B_{pos-neg}(V_{apli}, H, T) e^{-\frac{(t-t_n)}{\tau}} (H(t-t_n) - H(t-t_n - \Delta T)) \right) \quad (2.1)$$

donde:

$I(t)$ corriente a través de la impedancia de medida Z_m en A .

A amplitud de la componente senoidal en A .

V_{apli} voltaje aplicado en kV .

H humedad en %.

T temperatura en $^{\circ}C$.

f frecuencia en Hz .

B_{pos} amplitud de picos en semiciclo positivo en A .

B_{neg} amplitud de picos en semiciclo negativo en A .

t_n tiempo de ocurrencia de picos en s .

τ tiempo de bajada de picos en s .

H función de Heaviside.

ΔT tiempo diferencial en s .

El modelo matemático propuesto caracteriza el comportamiento del efecto corona a partir del voltaje de inyección. La parametrización de los elementos constitutivos del modelo se realizó mediante mediciones experimentales, aplicando tensiones superiores al voltaje crítico calculado mediante la fórmula de Peek [4]. La determinación de los parámetros óptimos del modelo se efectuó mediante análisis estadístico y herramientas de ajuste numérico implementadas en MATLAB.

2.3 Parametrización de los elementos del modelo propuesto

La caracterización del modelo se realizó mediante un análisis de los componentes de corriente. La separación entre la componente sinusoidal y las componentes impulsivas (picos de corona) permitió identificar y cuantificar con precisión los parámetros específicos de cada componente del modelo.

2.3.1 Ajuste de los parámetros sinusoidales

El análisis de la componente sinusoidal de la corriente se inició mediante la implementación de un filtro digital FIR (Finite Impulse Response) pasabanda. La

selección de las frecuencias de corte se realizó considerando la necesidad de aislar específicamente la componente fundamental, atenuando las demás componentes espectrales de la señal. Como resultado de este proceso de filtrado, se obtuvo el siguiente comportamiento de la componente sinusoidal:

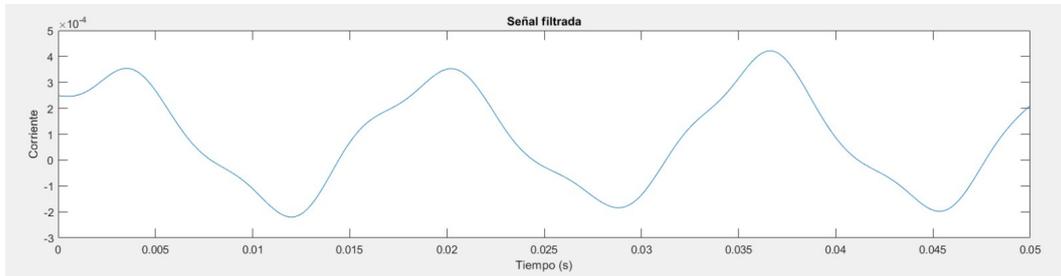


Figura 2.4: Componente sinusoidal de la corriente filtrada.

El análisis de la gráfica 2.4 revela un comportamiento no lineal de la corriente en función del tiempo, lo cual determina la necesidad de caracterizar el parámetro "A" mediante una ecuación no lineal.

Se implementó un ajuste mediante el algoritmo de optimización de mínimos cuadrados no lineales (función `lsqcurvefit` de MATLAB) para la componente sinusoidal de cada conjunto de datos obtenidos. Las amplitudes resultantes (A) se promediaron para mediciones bajo condiciones experimentales idénticas de voltaje y parámetros ambientales (ver figura 2.5). Con el propósito de evaluar la dependencia del parámetro "A" respecto a las variables experimentales estudiadas (V_{apli} , U_o , T y H), se efectuó un análisis comparativo mediante representaciones gráficas bivariadas. Las correlaciones entre "A" y cada variable independiente se presentan en la figura C.4.

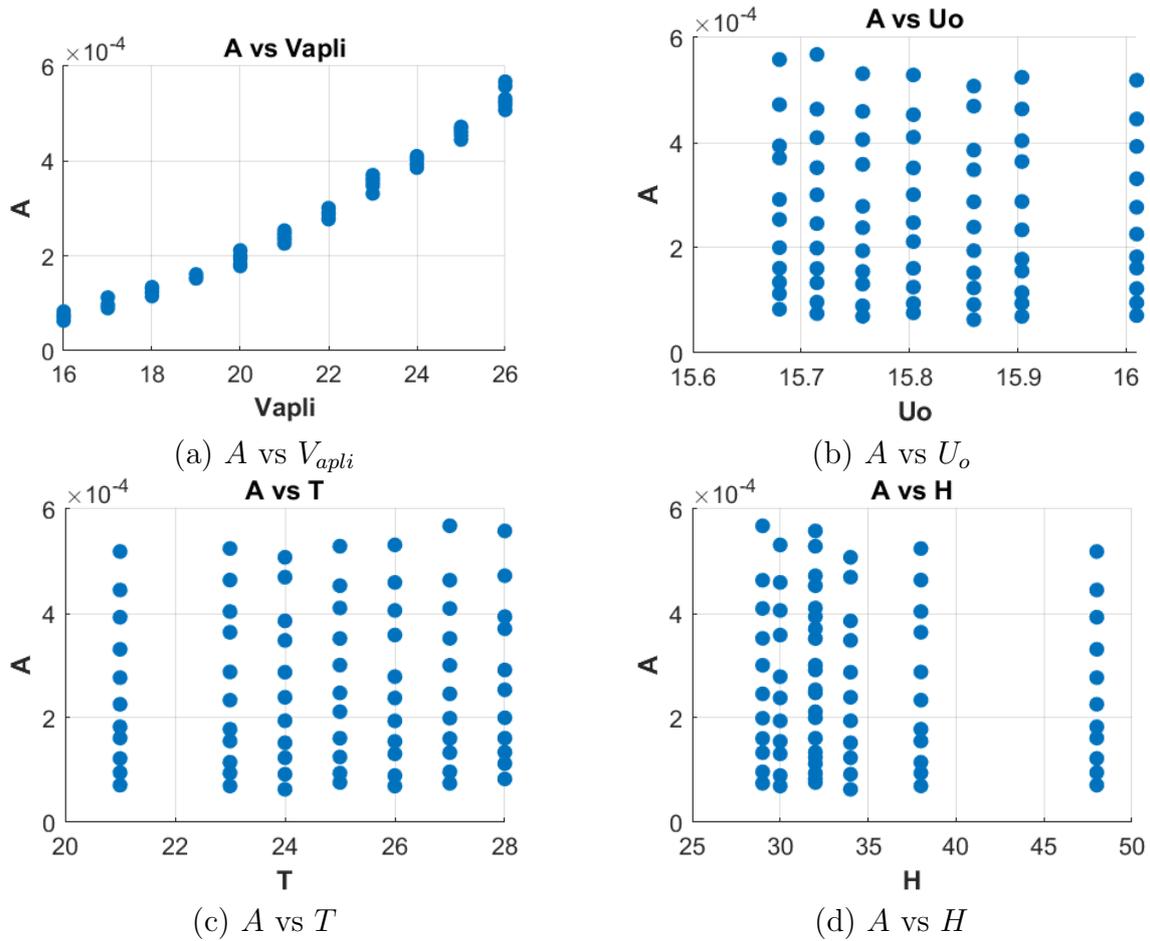


Figura 2.5: A vs Variables experimentales

A partir del análisis de las relaciones gráficas establecidas, se identificó que el parámetro A exhibe una dependencia predominante con respecto al voltaje aplicado (98.69%). Esta correlación significativa fundamentó el desarrollo de un modelo matemático para caracterizar el comportamiento de A , el cual se expresa como:

$$A(V_{apli}) = \alpha_1 V_{apli}^2 + \alpha_2 V_{apli} + \alpha_3 \quad (2.2)$$

donde:

$\alpha_1 - \alpha_3$ son coeficientes.

Para la determinación precisa de los coeficientes α , se implementó un procedimiento de ajuste numérico mediante MATLAB. Los resultados del ajuste, cuya representación gráfica se presenta en el anexo C.1, arrojaron los siguientes valores:

$$\alpha_1 = 2.421 \times 10^{-6}$$

$$\alpha_2 = -5.554 \times 10^{-5}$$

$$\alpha_3 = 3.438 \times 10^{-4}$$

2.3.2 Ajuste de los parámetros impulsivos

La detección de impulsos positivos y negativos implementa un proceso adaptativo de calibración basado en tres parámetros fundamentales: ventana temporal, umbral asimétrico y prominencia.

- La ventana temporal establece un periodo de análisis de 1 ms para capturar las características de las descargas corona, permitiendo el cálculo de la desviación estándar móvil y media móvil del valor absoluto de la señal.
- Dentro de esta ventana se determina la altura mínima de los umbrales, los cuales corresponden a la media más un factor multiplicado por la desviación estándar. Este factor recibe el valor de 2.5 y 1.2 para pulsos positivos y negativos respectivamente. Estos valores fueron calibrados hasta conseguir un margen de error mínimo, es decir, evitar falsos positivos. Esta diferencia entre los factores se debe a la naturaleza del efecto corona.
- Para la prominencia se implementa la desviación absoluta mediana (MAD), normalizada a escala de desviación estándar mediante la división por el cuartil Q_{75} de una distribución normal (0.6745) [11]. La condición de detección de picos se define como:

$$Prominencia > 2 \left(\frac{MAD}{0.6745} \right) \quad (2.3)$$

Esta parametrización configura la función `findpeaks` de MATLAB para la identificación de picos en la señal, como se ilustra en la figura 2.6.

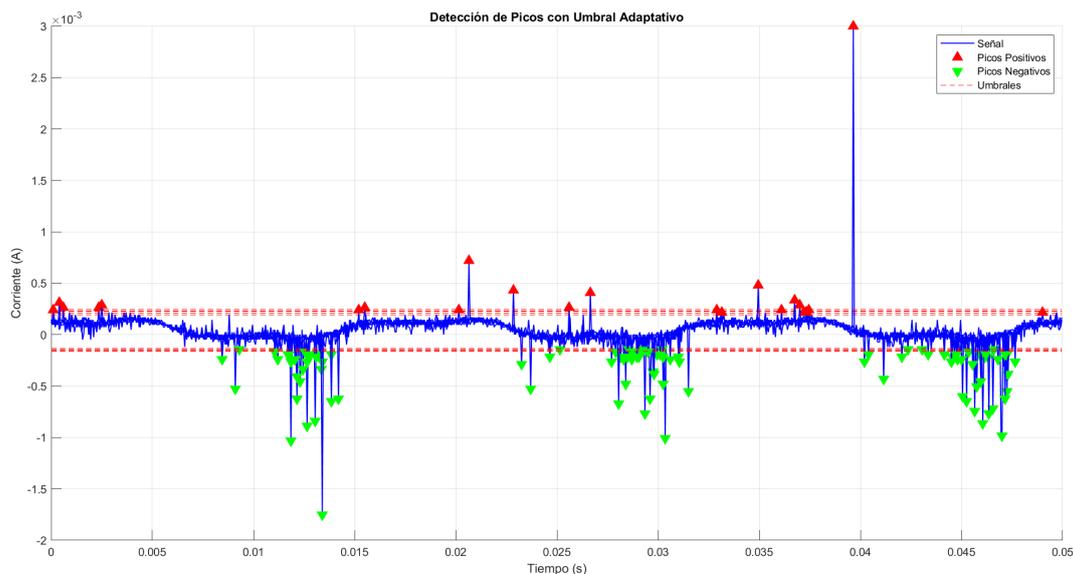


Figura 2.6: Detección de picos

Las amplitudes se determinaron mediante análisis cuantitativo de los datos. Para polaridad positiva, el histograma define el criterio, seleccionando el valor máximo donde coinciden alta amplitud y frecuencia. En casos de múltiples amplitudes con igual frecuencia, se implementa el valor medio entre estas (ver figura B.1). Para polaridad negativa, la amplitud corresponde al valor medio calculado del conjunto total de picos detectados.

De manera análoga al análisis realizado para los parámetros senoidales, se efectuó un estudio comparativo mediante gráficas bivariantes para evaluar la dependencia del parámetro "B" respecto a las variables experimentales (ver figura 2.7). El análisis reveló un comportamiento distintivo en comparación con el parámetro "A", mientras este último exhibe una dependencia prácticamente exclusiva del voltaje aplicado, el parámetro "B" manifiesta correlaciones tanto con la temperatura como con la humedad. Esta interdependencia fundamenta la necesidad de proponer un modelo multivariable para caracterizar el comportamiento del parámetro "B".

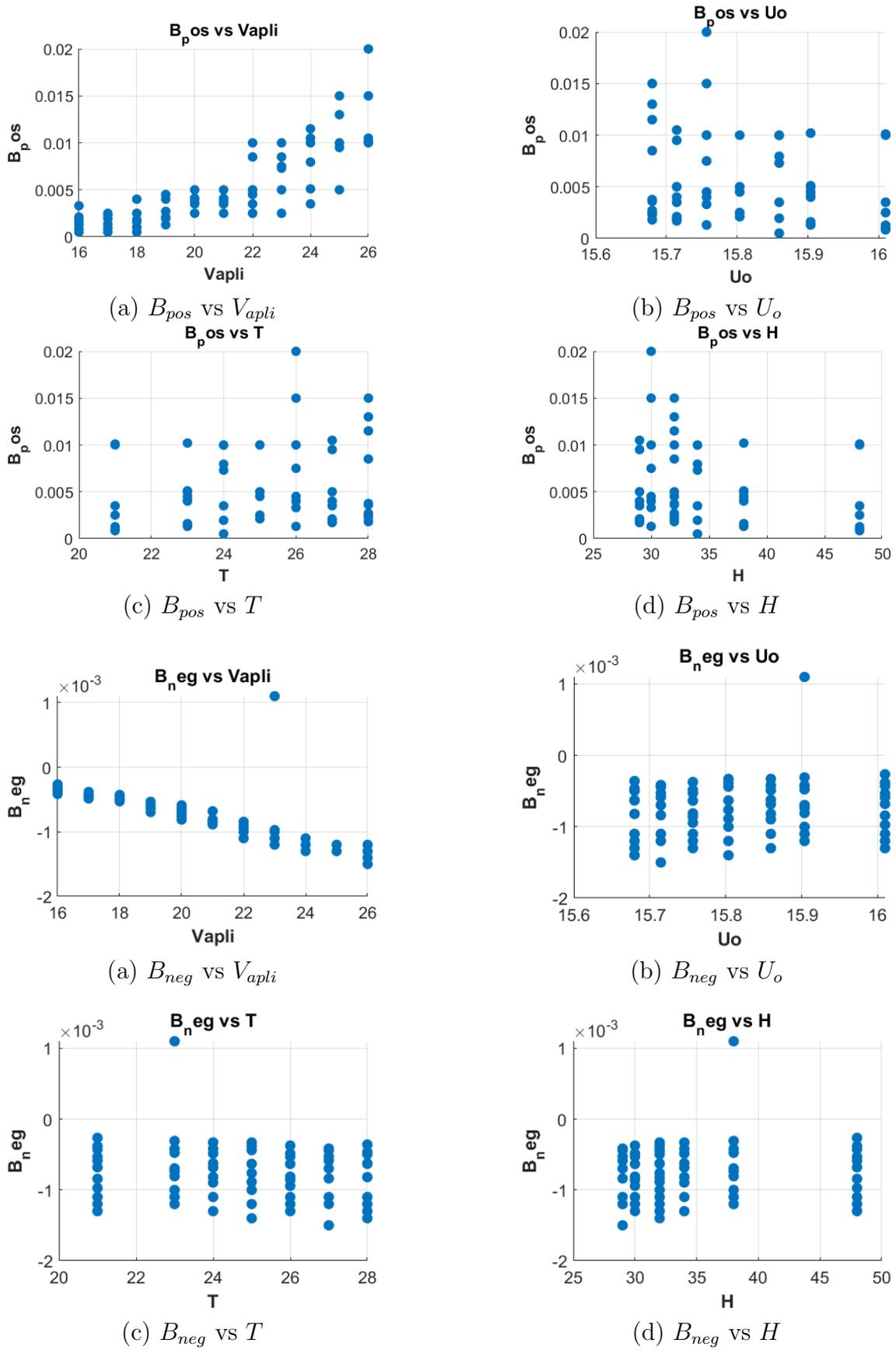


Figura 2.7: B vs Variables experimentales

El análisis de correlación multivariable muestra correlaciones significativas entre las amplitudes B_{pos} y B_{neg} con las variables independientes. El voltaje aplicado presenta la correlación más fuerte (0.8299 y -0.7802), seguido por correlaciones más débiles con temperatura (0.2510 y -0.1564) y humedad (-0.2438 y 0.1331), ver figura C.4.

El modelo matemático propuesto es:

$$B(V_{apli}, T, H) = \beta_1 V_{apli}^2 + \beta_2 V_{apli} + \beta_3 T + \beta_4 H + \beta_5 V_{apli} T + \beta_6 V_{apli} H + \beta_7 \quad (2.4)$$

donde:

$\beta_1 - \beta_7$ son coeficientes específicos para cada caso (B_{pos} y B_{neg}).

Para determinar los coeficientes β se implementó un análisis de regresión lineal múltiple utilizando el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO). El cálculo se ejecutó mediante la función regress del software MATLAB, lo que permitió obtener los siguientes coeficientes:

Coeficiente	B_{pos}	B_{neg}
β_1	1.0627×10^{-4}	-2.3116×10^{-6}
β_2	-6.2367×10^{-3}	2.6018×10^{-4}
β_3	-1.857×10^{-3}	1.3573×10^{-4}
β_4	-2.3453×10^{-4}	3.7847×10^{-5}
β_5	1.0267×10^{-4}	-7.9533×10^{-6}
β_6	8.0556×10^{-6}	-1.8635×10^{-6}
β_7	8.3215×10^{-2}	-4.4074×10^{-6}

Tabla 2.1: Coeficientes para B_{pos} y B_{neg}

2.3.2.1 Número de Picos

Con base en el criterio establecido para la detección de picos en la Sección 2.3.2, se realiza un conteo de picos en todas las señales analizadas. Este conteo se normaliza dividiendo el número total de picos detectados entre la cantidad de archivos procesados y el número de ciclos considerados (tres ciclos). El resultado obtenido corresponde al promedio de picos por semiciclo.

La identificación de correlaciones entre el conjunto de datos y variables relevantes se efectúa mediante la función regress de MATLAB aplicada a la ecuación:

$$n = \gamma_1 V_{apli}^2 + \gamma_2 V_{apli} + \gamma_3 T + \gamma_4 H + \gamma_5 V_{apli} T + \gamma_6 V_{apli} H + \gamma_7 \quad (2.5)$$

donde:

$\gamma_1 - \gamma_7$ son coeficientes.

El resultado obtenido se aproxima al entero más cercano para n_{pos} y n_{neg} .

2.3.3 Ajuste de la componente estadística

La caracterización temporal de los picos de amplitud (tanto positivos como negativos) se basa en la parametrización de una distribución gaussiana, considerando tres variables fundamentales: período, desviación estándar y media. La síntesis de los tiempos de ocurrencia se implementa mediante un algoritmo que emplea esta distribución normal parametrizada.

CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN DEL EFECTO CORONA

3.1 Circuito para obtención del efecto corona

De acuerdo con lo establecido en la sección 2.2.1, la señal característica del efecto corona consta de cuatro componentes fundamentales: componente senoidal base, picos positivos, picos negativos y componente estadística. La implementación del modelo se realiza en el software ATP Draw, bajo los siguientes parámetros de simulación:

3.1.1 Componente senoidal

La ecuación obtenida en la sección 2.3.1 fue:

$$A = 2.4210 \times 10^{-6} \cdot V_{apli}^2 - 5.5540 \times 10^{-5} \cdot V_{apli} + 3.4380 \times 10^{-4} \quad (3.1)$$

El modelo eléctrico utiliza una resistencia no lineal (resistencia variable R(i) tipo 92 en ATP Draw) con una característica V-I configurable.

3.1.2 Componente impulsiva

La ecuación obtenida en la sección 2.3.2 fue:

$$\begin{aligned}
B_{\text{pos}} &= 1.0627 \times 10^{-4} \cdot \text{Vapli}^2 - 6.2367 \times 10^{-3} \cdot \text{Vapli} - 1.8570 \times 10^{-3} \cdot T \\
&\quad - 2.3453 \times 10^{-4} \cdot H + 1.0267 \times 10^{-4} \cdot (\text{Vapli} \cdot T) \\
&\quad + 8.0556 \times 10^{-6} \cdot (\text{Vapli} \cdot H) + 8.3215 \times 10^{-2}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
B_{\text{neg}} &= -2.3116 \times 10^{-6} \cdot \text{Vapli}^2 + 2.6018 \times 10^{-4} \cdot \text{Vapli} + 1.3573 \times 10^{-4} \cdot T \\
&\quad + 3.7847 \times 10^{-5} \cdot H - 7.9533 \times 10^{-6} \cdot (\text{Vapli} \cdot T) \\
&\quad - 1.8635 \times 10^{-6} \cdot (\text{Vapli} \cdot H) - 4.4074 \times 10^{-3}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Donde se puede apreciar la misma estructura, pero con diferentes constantes. Para la cual se dividirá en varias componentes, así:

$$B_{\text{pos}_1} = 1.0627 \times 10^{-4} \cdot \text{Vapli}^2 - 6.2367 \times 10^{-3} \cdot \text{Vapli} + 8.3215 \times 10^{-2} \tag{3.4}$$

El modelo eléctrico se implementa mediante una resistencia no lineal (tipo 92).

$$B_{\text{pos}_2} = -1.8570 \times 10^{-3} \cdot T = \frac{-T}{538.5029618} \tag{3.5}$$

El modelo eléctrico se implementa mediante una resistencia en serie con una fuente de tensión DC, siguiendo la relación establecida por la ley de Ohm.

$$B_{\text{pos}_3} = -2.3453 \times 10^{-4} \cdot H = \frac{-H}{4263.846843} \tag{3.6}$$

El modelo eléctrico se implementa mediante una resistencia en serie con una fuente de tensión DC.

$$B_{\text{pos}_4} = 1.0267 \times 10^{-4} \cdot (\text{Vapli} \cdot T) = \frac{\text{Vapli} \cdot T}{9739.943508} \tag{3.7}$$

El sistema se representa mediante un circuito equivalente compuesto por una resistencia en serie con una fuente de tensión controlada. La fuente AC modulada es controlada por el TACS: fuente DC-11 en ATP Draw, que ejecuta la multiplicación de dos variables. La señal resultante en AC requiere una conversión a DC, implementada mediante un rectificador de onda completa (puente de diodos) y un capacitor

de filtrado para minimizar el rizado de la señal de salida.

$$B_{\text{pos}_5} = 8.0556 \times 10^{-6} \cdot (V_{\text{apli}} \cdot H) = \frac{V_{\text{apli}} \cdot H}{124137.2461} \quad (3.8)$$

El sistema se representa mediante un circuito equivalente compuesto por una resistencia en serie con una fuente de tensión controlada.

Este proceso se repite para la ecuación B_{neg} , en el cual se obtuvieron valores similares pero con la diferencia de que presentan los signos invertidos.

3.1.3 Componente estadística

Esta propiedad del efecto corona se determina mediante el comando "normrnd" de MATLAB en la sección 2.3.3. Debido a los requerimientos de herramientas computacionales avanzadas para su implementación, es necesario realizar el ajuste manual de valores en cada switch, tanto para los semiciclos positivos como negativos.

El resultado final corresponde a la sumatoria de los componentes individuales, su modelación se presenta en la figura 3.1.

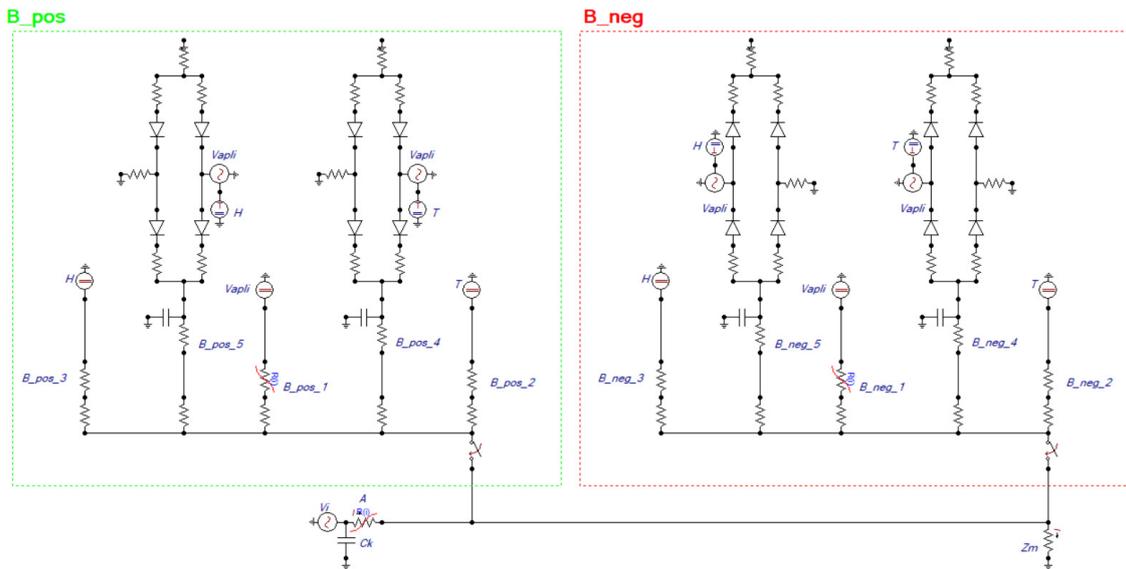


Figura 3.1: Modelo propuesto del efecto corona en ATP Draw

CAPÍTULO 4

VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Método para validar

La metodología utilizada para validar el modelo propuesto se basa en un análisis comparativo en dos dimensiones: gráfica y analítica. Este proceso emplea como referencia los datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Alta Tensión.

El análisis gráfico consiste en una evaluación de las curvas características generadas por el modelo simulado en el ATP (Alternative Transients Program), comparándolas con los registros experimentales.

En cuanto al análisis analítico, se definen dos parámetros clave para la evaluación:

1. La corriente eficaz (IRMS)
2. La corriente pico (I_p)

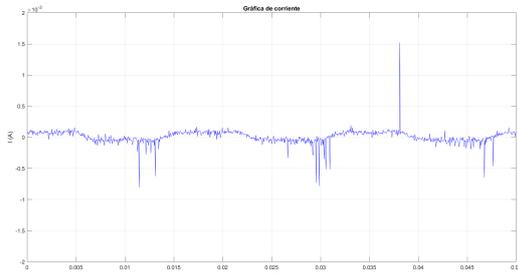
Estos indicadores se extraen y analizan tanto del conjunto de datos experimentales como de los resultados de la simulación, permitiendo una validación cuantitativa del modelo propuesto.

4.2 Resultados

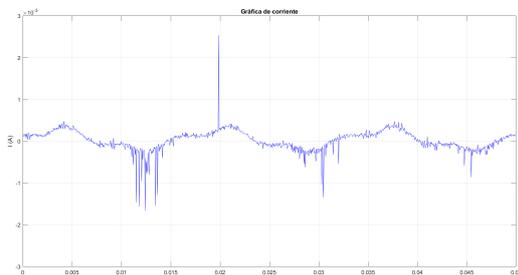
La Figura 4.1 presenta los resultados experimentales obtenidos en el Laboratorio de Alta Tensión y las simulaciones computacionales del modelo propuesto. Los en-

sayos experimentales se realizaron bajo condiciones ambientales controladas, con una temperatura de 21 °C y una humedad relativa del 48 %.

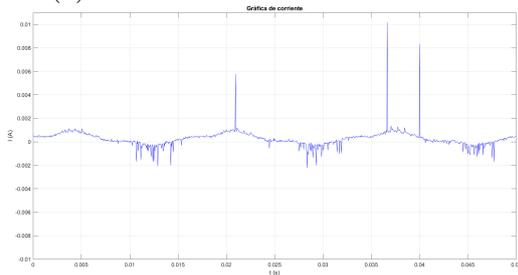
Laboratorio



(a) Gráfica de corriente a 16kV

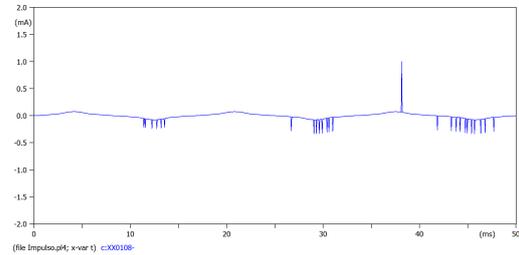


(c) Gráfica de corriente a 21kV

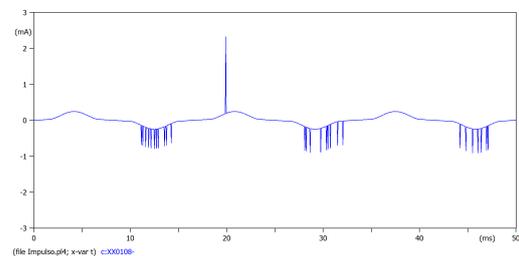


(e) Gráfica de corriente a 26kV

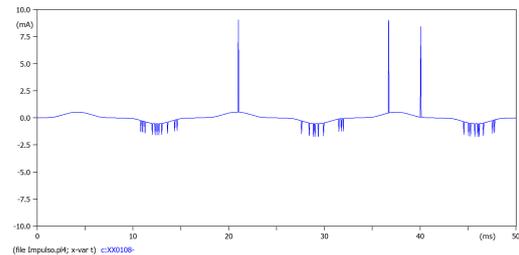
ATP Draw



(b) Gráfica de corriente a 16kV



(d) Gráfica de corriente a 21kV



(f) Gráfica de corriente a 26kV

Figura 4.1: Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 21 °C de temperatura y 48% de humedad relativa.

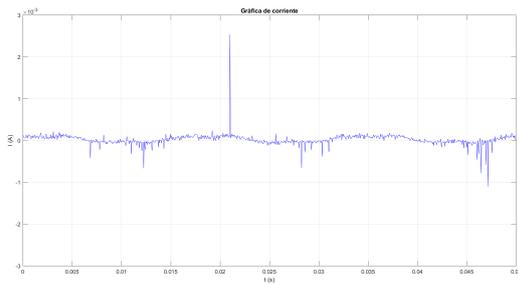
Los resultados analíticos correspondientes a los ensayos realizados bajo las condiciones ambientales especificadas (temperatura de 21°C y humedad relativa del 48%) se presentan en la Tabla 4.1. La tabulación incluye los parámetros fundamentales de corriente eficaz (I_{rms}), corriente pico (I_p) y el error relativo asociado, para diferentes niveles de tensión aplicada (V_{apli}).

Tabla 4.1: Validación de Resultados

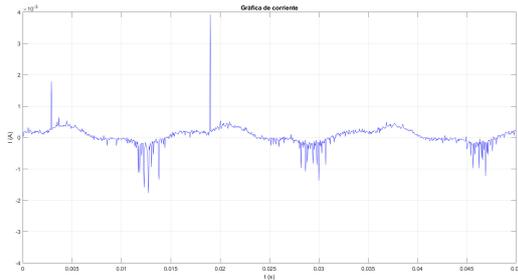
Valores Laboratorio			
V_{apli} (kV)	I_{rms} (mA)	I_p (mA)	$E_r I_{rms}$ (%)
16	0.1	1.52	11.6
21	0.24	2.54	15.6
26	0.7	10.16	10.6
Valores simulados en ATP			
V_{apli}	I_{rms}	I_p	
16	0.0884	1.00	
21	0.2024	2.97	
26	0.6255	9.29	

La Figura 4.2 ilustra otro conjunto de mediciones comparativas, realizadas a una temperatura de 23 °C y humedad relativa del 38 %. Se observa la respuesta del sistema bajo estas nuevas condiciones ambientales.

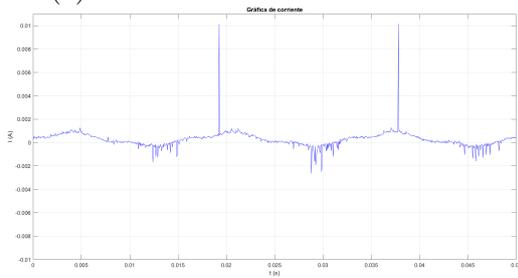
Laboratorio



(a) Gráfica de corriente a 16kV

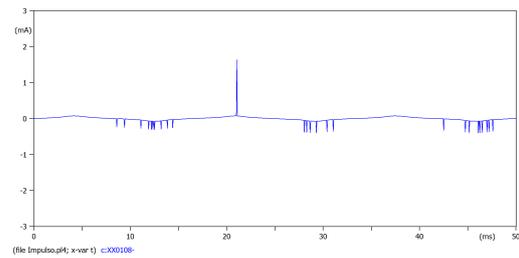


(c) Gráfica de corriente a 21kV

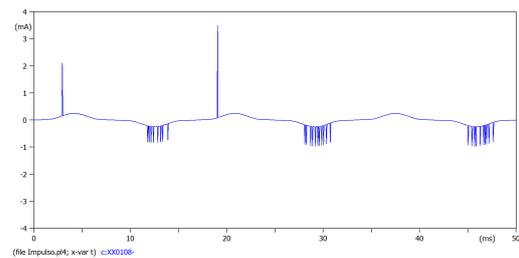


(e) Gráfica de corriente a 26kV

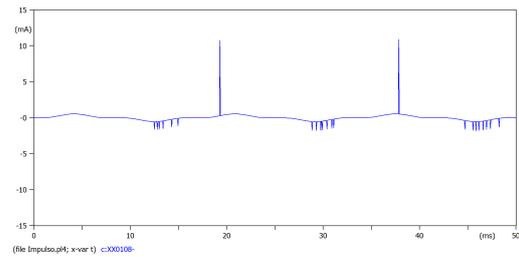
ATP Draw



(b) Gráfica de corriente a 16kV



(d) Gráfica de corriente a 21kV



(f) Gráfica de corriente a 26kV

Figura 4.2: Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 23 °C de temperatura y 38% de humedad relativa.

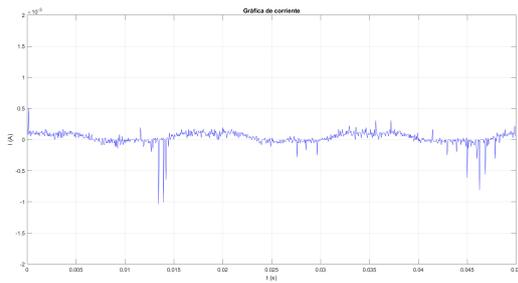
Los resultados analíticos correspondientes a este conjunto de mediciones se exponen en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Validación de Resultados

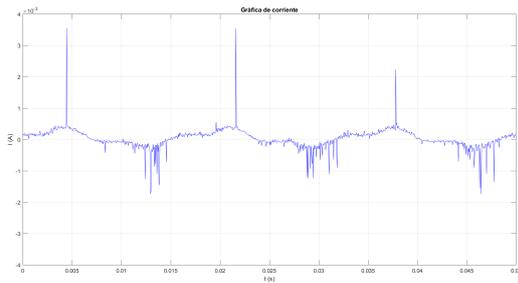
Valores Laboratorio			
V_{apli} (kV)	I_{rms} (mA)	I_p (mA)	$E_r I_{rms}$ (%)
16	0.09	2.54	6.8
21	0.29	3.92	19.68
26	0.7	10.16	13.7
Valores simulados en ATP			
V_{apli}	I_{rms}	I_p	
16	0.0838	1.64	
21	0.2329	3.5	
26	0.6036	10.88	

La Figura 4.3 muestra un tercer conjunto de mediciones comparativas del sistema. En este caso, las pruebas de laboratorio y simulaciones se efectuaron con una temperatura ambiente de 24 °C y una humedad relativa del 34 %.

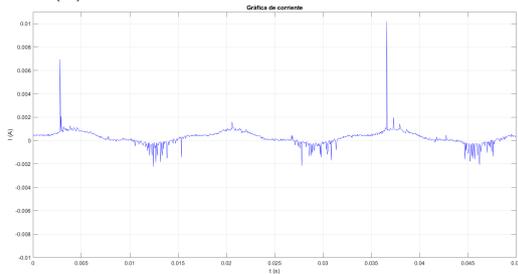
Laboratorio



(a) Gráfica de corriente a 16kV

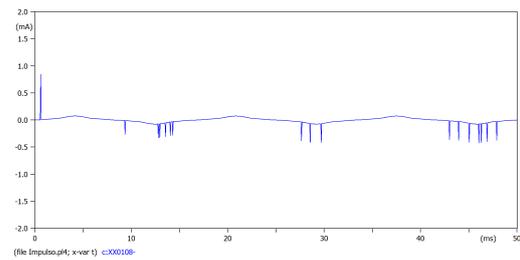


(c) Gráfica de corriente a 21kV

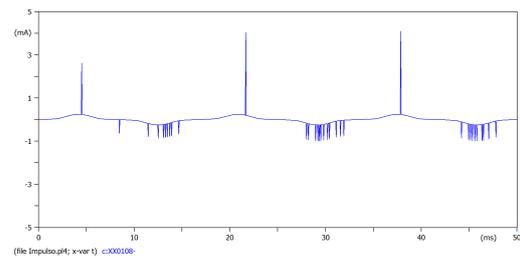


(e) Gráfica de corriente a 26kV

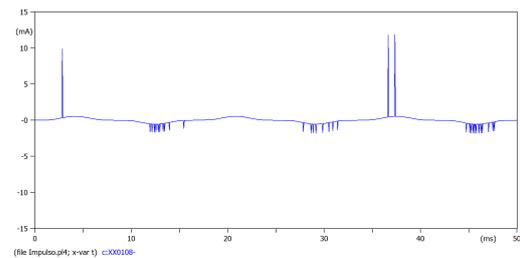
ATP Draw



(b) Gráfica de corriente a 16kV



(d) Gráfica de corriente a 21kV



(f) Gráfica de corriente a 26kV

Figura 4.3: Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 24 °C de temperatura y 34% de humedad relativa.

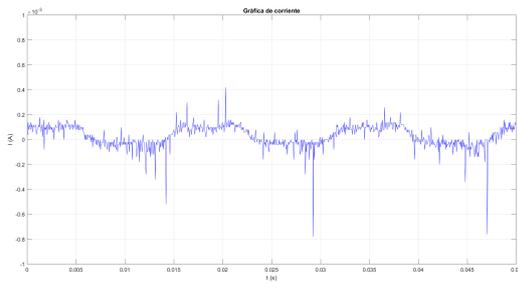
Los resultados analíticos de este tercer conjunto de gráficas se exponen en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Validación de Resultados

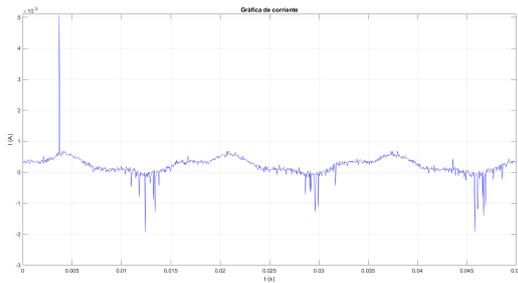
Valores Laboratorio			
V_{apli} (kV)	I_{rms} (mA)	I_p (mA)	$E_r I_{rms}$ (%)
16	0.1	1.52	11.6
21	0.24	2.54	15.6
26	0.7	10.16	10.6
Valores simulados en ATP			
V_{apli}	I_{rms}	I_p	
16	0.0884	1.00	
21	0.2024	2.97	
26	0.6255	9.29	

Un cuarto conjunto de mediciones comparativas se exponen en la figura 4.4, donde las condiciones ambientales son: temperatura ambiente de 25 °C y humedad relativa del 32 %.

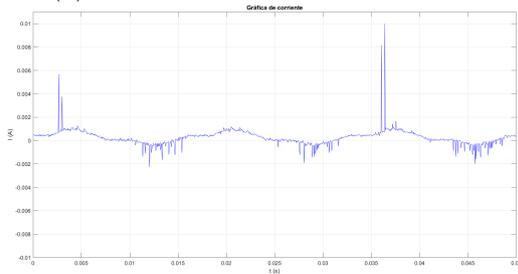
Laboratorio



(a) Gráfica de corriente a 16kV

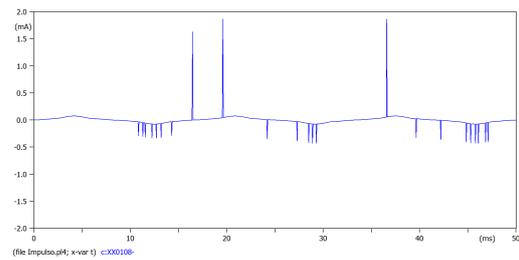


(c) Gráfica de corriente a 21kV

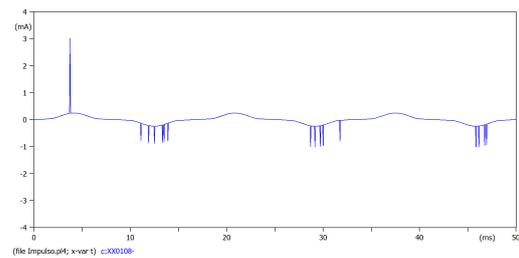


(e) Gráfica de corriente a 26kV

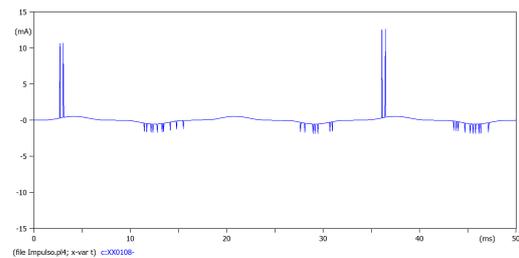
ATP Draw



(b) Gráfica de corriente a 16kV



(d) Gráfica de corriente a 21kV



(f) Gráfica de corriente a 26kV

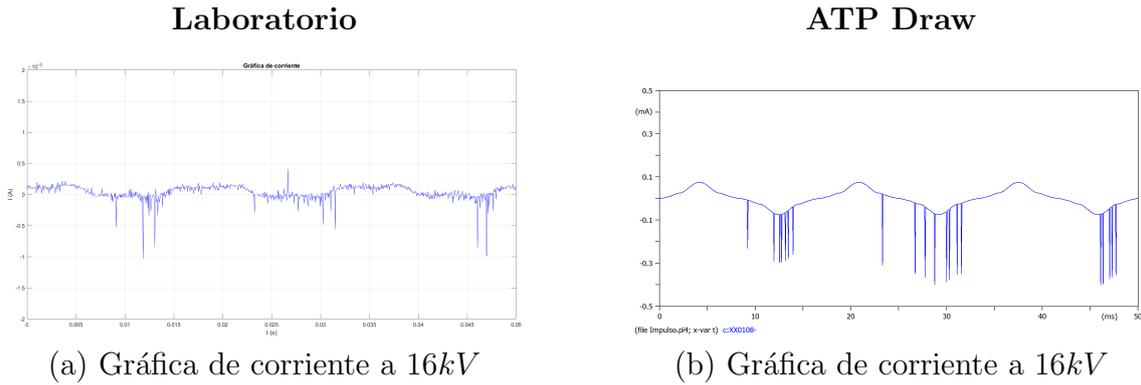
Figura 4.4: Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 25 °C de temperatura y 32% de humedad relativa.

Los resultados analíticos para este cuarto conjunto de mediciones comparativas se exponen en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Validación de Resultados

Valores Laboratorio			
V_{apli} (kV)	I_{rms} (mA)	I_p (mA)	$E_r I_{rms}$ (%)
16	0.1	1.52	11.6
21	0.24	2.54	15.6
26	0.7	10.16	10.6
Valores simulados en ATP			
V_{apli}	I_{rms}	I_p	
16	0.0884	1.00	
21	0.2024	2.97	
26	0.6255	9.29	

La comparativa presentada en la Figura 4.5 corresponde a mediciones realizadas bajo condiciones de mayor temperatura, específicamente a 28 °C y con una humedad relativa del 32 %.

**Figura 4.5:** Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 28 °C de temperatura y 32% de humedad relativa.

Se presentan los resultados analíticos para estas condiciones en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Validación de Resultados

Valores Laboratorio			
V_{apli} (kV)	I_{rms} (mA)	I_p (mA)	$E_r I_{rms}$ (%)
16	0.1	1.52	11.6
Valores simulados en ATP			
V_{apli}	I_{rms}	I_p	
16	0.0884	1.00	

4.2.1 Ensayo de Precipitación en Cámara de Lluvia

Para concluir la fase experimental, se efectuó el ensayo de precipitación bajo condiciones controladas. La preparación del agua se realizó siguiendo los protocolos establecidos en el IEEE Std 4 [12]. La adquisición de datos se llevó a cabo utilizando la cámara de lluvia [13] disponible en las instalaciones del laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana.

La Figura 4.6 muestra la comparación entre los datos experimentales obtenidos y los resultados de la simulación numérica, realizados bajo condiciones de operación de 16 kV, humedad relativa del 78% y temperatura ambiente de 18.7 °C.

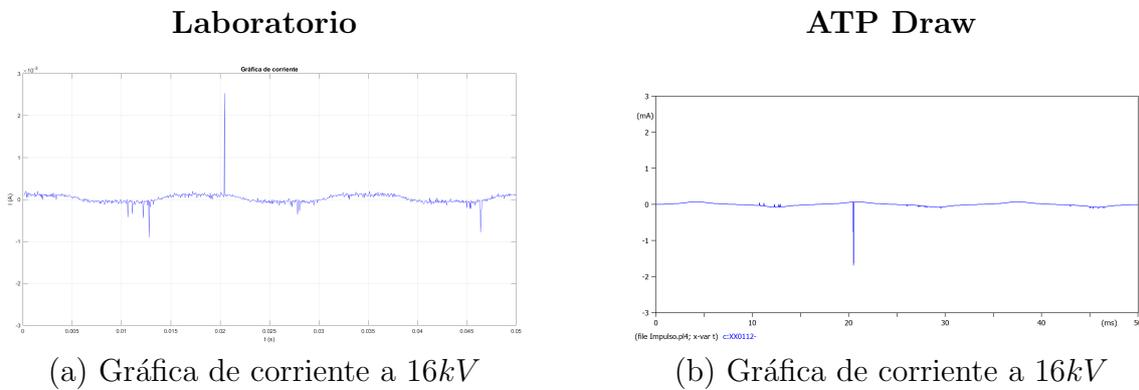


Figura 4.6: Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 18.7 °C de temperatura y 78% de humedad relativa.

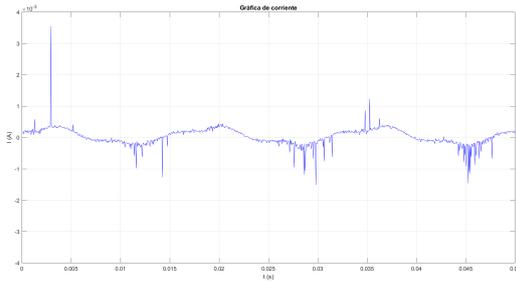
Los resultados analíticos para estas condiciones se presentan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Validación de Resultados

Valores Laboratorio			
V_{apli} (kV)	I_{rms} (mA)	I_p (mA)	$E_r I_{rms}$ (%)
16	0.12	2.54	44.5
Valores simulados en ATP			
V_{apli}	I_{rms}	I_p	
16	0.0666	1.69	

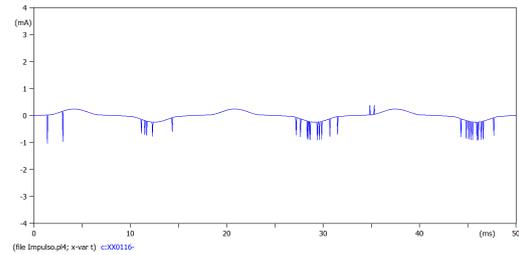
En la Figura 4.7 se presenta la segunda comparación entre resultados experimentales y simulados, realizada con un voltaje aplicado de 21 kV bajo condiciones ambientales de 72% de humedad relativa y 19.5 °C.

Laboratorio



(a) Gráfica de corriente a 21kV

ATP Draw



(b) Gráfica de corriente a 21kV

Figura 4.7: Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 19.5 °C de temperatura y 72% de humedad relativa.

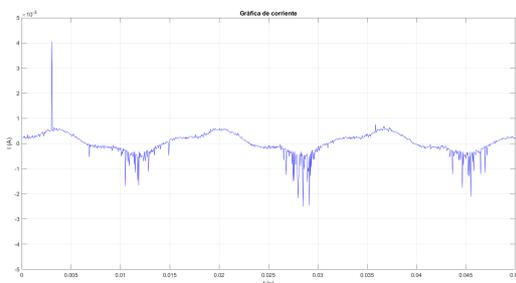
Los resultados analíticos de esta comparación se encuentran detallados en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Validación de Resultados

Valores Laboratorio				
V_{apli} (kV)	I_{rms} (mA)	I_p (mA)	E_r	I_{rms} (%)
21	0.27	3.56		31.37
Valores simulados en ATP				
V_{apli}	I_{rms}	I_p		
21	0.1853	1.03		

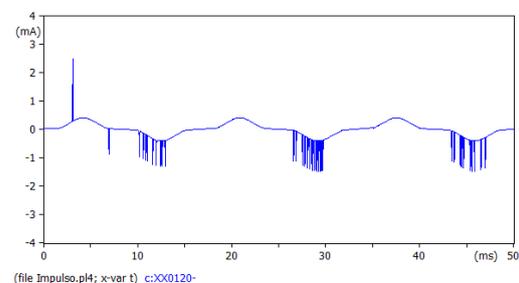
La Figura 4.8 ilustra la comparación final entre los resultados experimentales y simulados, efectuada con un nivel de tensión de 24 kV y condiciones ambientales de 19.5 °C y 72% de humedad relativa.

Laboratorio



(a) Gráfica de corriente a 24kV

ATP Draw



(b) Gráfica de corriente a 24kV

Figura 4.8: Gráficas de corriente experimentales vs simuladas en condiciones controladas 19.5 °C de temperatura y 72% de humedad relativa.

Los resultados analíticos correspondientes a esta medición se encuentran registrados en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Validación de Resultados

Valores Laboratorio			
V_{apli} (kV)	I_{rms} (mA)	I_p (mA)	$E_r I_{rms}$ (%)
24	0.43	4.06	25
Valores simulados en ATP			
V_{apli}	I_{rms}	I_p	
24	0.3246	2.47	

4.3 Análisis de Resultados

Los resultados presentan un margen de error que varía entre 6% y 15%. Este comportamiento se debe principalmente a la metodología utilizada para el procesamiento de datos. En primer lugar, al realizar un promedio de los picos positivos y negativos, las gráficas resultantes no muestran diferencias significativas entre los picos de cada semiciclo. Esto difiere de las imágenes obtenidas en laboratorio, donde los picos presentan variaciones más notorias.

Otro factor que influye en el error es la sumatoria de corrientes para B_{pos} y B_{neg} en ATP Draw. Aunque se emplean resistencias unitarias para garantizar la conexión adecuada de los nodos en el circuito, se observa una ligera pérdida o ganancia de amplitud que afecta los resultados. Este comportamiento puede estar relacionado con las características de simulación del software.

Los datos de laboratorio también contribuyen al margen de error. En algunos casos, las imágenes capturadas no son suficientemente claras, lo que dificulta la detección precisa de los picos. Este inconveniente lleva a que el criterio de detección se ajuste más a los valores negativos frecuentes que a los positivos, lo que puede generar falsos positivos. En la simulación de ATP, esto resulta en pulsos promediados según los parámetros establecidos, lo que puede diferir de los valores reales observados en laboratorio.

Particularmente en los ensayos bajo condiciones de precipitación, se observan discrepancias más significativas entre las mediciones experimentales y las simulaciones. Este incremento en el margen de error sugiere que el modelo actual requiere

ajustes adicionales para contemplar los efectos específicos de la lluvia. La precipitación introduce diversos factores que afectan el comportamiento del efecto corona y que no están completamente capturados en el modelo actual.

El incremento abrupto de la humedad relativa durante la precipitación, que alcanza valores de hasta 78%, podría estar generando un comportamiento no lineal que el modelo actual no contempla adecuadamente. Esto sugiere que la relación entre la humedad y la intensidad del efecto corona podría necesitar una caracterización más detallada bajo condiciones extremas. Asimismo, otro aspecto a considerar es que la presencia de gotas de agua podría estar modificando la geometría efectiva del conductor, creando puntos de concentración de campo eléctrico adicionales que pueden intensificar el efecto corona.

Adicionalmente, la conductividad del aire circundante se ve alterada por la presencia de gotas de agua, lo que modifica los patrones de ionización y, consecuentemente, las características de la descarga corona. Para mejorar la precisión del modelo bajo estas condiciones, sería necesario incorporar factores de corrección que consideren estos cambios en la geometría efectiva del conductor.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El desarrollo de esta investigación permitió alcanzar el objetivo general de obtener un modelo del efecto corona en conductores eléctricos que integra tanto la componente sinusoidal como la impulsiva, considerando la influencia de factores ambientales clave como temperatura y humedad. El modelo propuesto demostró ser capaz de reproducir el comportamiento del efecto corona con un nivel de precisión aceptable, lo cual fue validado mediante la comparación entre resultados simulados y experimentales.

Durante los ensayos realizados bajo condiciones de precipitación, se identificaron discrepancias significativas entre los resultados experimentales y las simulaciones. Estas diferencias indican que el modelo requiere ajustes adicionales para incorporar de manera más precisa los efectos específicos de la lluvia. Este fenómeno puede implicar múltiples factores, como el aumento sustancial de la humedad relativa (que puede alcanzar hasta un 78% e incluso ser mayor), la alteración de la geometría efectiva del conductor debido a la presencia de gotas de agua y los cambios en la conductividad del aire circundante. Debido a que estos aspectos no han sido completamente considerados en el modelo actual, se destaca la necesidad de una caracterización más exhaustiva que permita representar de manera adecuada la relación entre la humedad y la intensidad del efecto corona en condiciones extremas.

La evaluación de modelos existentes permitió identificar la necesidad de un enfoque que combine componentes sinusoidales e impulsivas para una representación más precisa del fenómeno. Este análisis fue fundamental para identificar las variables críticas que debían considerarse en el desarrollo del nuevo modelo, estableciendo así una base sólida para la investigación.

Se logró caracterizar matemáticamente la relación entre el voltaje aplicado y las componentes del efecto corona mediante un análisis de correlación. La implementación en ATP mediante elementos lineales, no lineales y controlados demostró ser una aproximación efectiva para la simulación del fenómeno. Los coeficientes de correlación obtenidos validaron la fuerte dependencia del efecto corona con respecto al voltaje aplicado y, en menor medida, con las variables ambientales.

El proceso experimental demostró ser robusto y sistemático, permitiendo la recolección de datos mediante el circuito de descargas parciales. La innovación en el uso del calentador eléctrico para modificar simultáneamente temperatura y humedad mejoró significativamente el proceso experimental. La naturaleza estocástica del efecto corona fue exitosamente caracterizada mediante el análisis en Matlab, proporcionando una base cuantitativa para el modelo.

La implementación del modelo en ATP y la posterior comparación entre datos simulados y experimentales validó el modelo propuesto, demostrando su capacidad para reproducir el comportamiento real del efecto corona. Sin embargo, los parámetros de número y tiempo de picos aún carecen de una definición exacta en la literatura, lo que representa una oportunidad para futuras investigaciones.

5.2 Recomendaciones

Se identificaron oportunidades de mejora para futuras investigaciones, particularmente en lo referente a la correlación con variables ambientales. Un estudio con rangos más amplios de temperatura y humedad podría proporcionar coeficientes de correlación más significativos. Asimismo, el modelo actual podría beneficiarse de una definición más precisa de los parámetros de número y tiempo de picos, aspectos que podrían ser abordados en investigaciones posteriores.

Ampliar el rango de estudio de las variables ambientales, especialmente la humedad, para capturar posibles comportamientos no lineales que surgen durante precipitaciones y que afectan significativamente el fenómeno.

Optimizar los algoritmos de detección de picos mediante análisis avanzados que minimicen el ruido y maximicen la confiabilidad. La implementación de redes neuronales permitiría tanto la detección robusta como la predicción de comportamientos.

Profundizar en la caracterización estadística del efecto corona para desarrollar modelos matemáticos de mayor precisión y representatividad.

Extender la validación del modelo mediante pruebas en diversos tipos de conductores y líneas de transmisión, considerando variaciones en la calidad de los materiales.

Incorporar variables ambientales adicionales para generar una ecuación compacta. Si bien la naturaleza estocástica del efecto corona impide una predicción determinística, el modelo resultante puede establecer un estándar de referencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Benito and A. Álvarez, *El Transporte de la Energía Eléctrica en Alta Tensión*. Colección Libro Docente/Universidad Politécnica de Valencia Series, Universidad Politécnica de Valencia. Servicio de Publicaciones, 1998.
- [2] L. A. Siegert, *Alta tensión y sistemas de transmisión*. AREA: INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA, Limusa.
- [3] B. V. Mena, “Efecto corona en líneas de transmisión de 500 kv,” bathesis, Escuela Politécnica Nacional, July 2008.
- [4] F. W. Peek, “The law of corona and the dielectric strength of air-ii,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XXXI, no. 1, pp. 1051–1092, 1912.
- [5] R. Zambrano, “Estudio de la factibilidad del modelado del efecto corona en una línea de transmisión usando un modelo a escala,” bathesis, Universidad de los Andes, Mar. 2007.
- [6] R. F. Sabaj, “Implementación de un modelo a escala para el estudio del efecto corona y medición de sus pérdidas según diversas condiciones y calidad del aire,” bathesis, Universidad de Chile, 2015.
- [7] “The authoritative dictionary of ieeec standards terms, seventh edition,” *IEEE Std 100-2000*, pp. 1–1362, 2000.
- [8] A. Ambardar *et al.*, *Analog and digital signal processing*. PWS Boston, MA, USA, 1995.
- [9] D. C. Montgomery, *Applied statistics and probability for engineers*. EMEA edition, Hoboken, NJ: Wiley, seventh edition ed., 2018.
- [10] F. M. Quizhpi Cuesta and F. X. Gómez Juca, “Determinación de condiciones de fuga, descargas parciales y superficiales en aisladores mediante el análisis de corrientes,” 2017.

- [11] R. R. Wilcox, “3 - summarizing data,” in *Applying Contemporary Statistical Techniques* (R. R. Wilcox, ed.), pp. 55–91, Burlington: Academic Press, 2003.
- [12] “Ieee standard for high-voltage testing techniques - redline,” *IEEE Std 4-2013 (Revision of IEEE Std 4-1995) - Redline*, pp. 1–500, 2013.
- [13] J. Ochoa C., J. Macas S., F. Quizhpi P., M. Quizhpi C., and F. Gómez J., “Development of a rain simulator for a hv laboratory,” in *2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, pp. 1–5, 2018.

ANEXOS

A Circuito de Laboratorio



Figura A.1: Circuito experimental

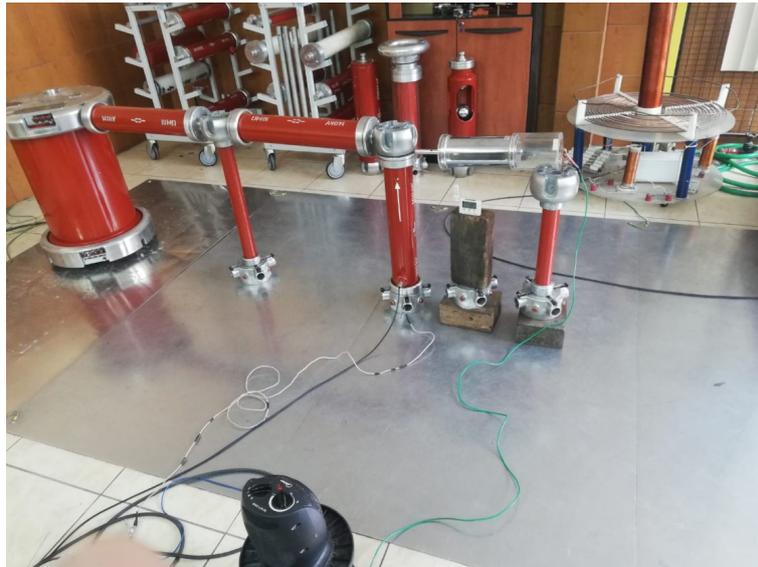
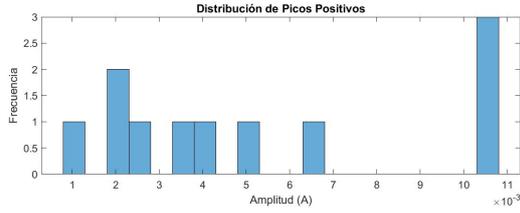


Figura A.2: Circuito experimental con calentador eléctrico

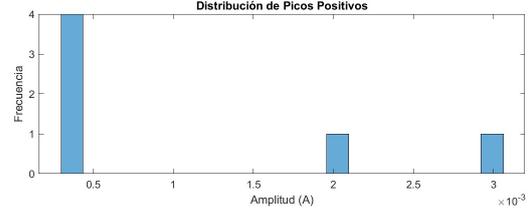


Figura A.3: Circuito experimental con cámara de lluvia

B Resultado parámetros MATLAB



(a) Caso de amplitud y frecuencia máxima



(b) Caso de frecuencias iguales

Figura B.1: Histograma picos positivos

Vapli	Uo	A	B_pos	B_neg	T (°C)	H (%)	P (hPa)	n_pos	n_neg
16	16,0097	7,11E-05	8,40E-04	-2,65E-04	21	48	753,6	2	10
17	16,0097	9,53E-05	9,00E-04	-3,82E-04	21	48	753,6	1	9
18	16,0097	1,22E-04	1,02E-03	-4,27E-04	21	48	753,6	1	12
19	16,0097	1,61E-04	1,27E-03	-5,34E-04	21	48	753,6	1	11
20	16,0097	1,83E-04	2,50E-03	-5,88E-04	21	48	753,6	1	12
21	16,0097	2,26E-04	2,50E-03	-6,80E-04	21	48	753,6	1	12
22	16,0097	2,77E-04	2,50E-03	-8,43E-04	21	48	753,6	1	12
23	16,0097	3,31E-04	2,50E-03	-9,72E-04	21	48	753,6	1	13
24	16,0097	3,93E-04	3,50E-03	-1,20E-03	21	48	753,6	2	14
25	16,0097	4,45E-04	1,00E-02	-1,20E-03	21	48	753,6	1	9
26	16,0097	5,19E-04	1,01E-02	-1,30E-03	21	48	753,6	1	10

Tabla B.1: Resultados parámetros a 21°C

Vapli	Uo	A	B_pos	B_neg	T (°C)	H (%)	P (hPa)	n_pos	n_neg
16	15,9038	6,96E-05	1,30E-03	-3,08E-04	23	38	751,5	3	8
17	15,9038	9,43E-05	1,35E-03	-4,20E-04	23	38	751,5	2	9
18	15,9038	1,15E-04	1,60E-03	-4,76E-04	23	38	751,5	1	9
19	15,9038	1,56E-04	4,00E-03	-6,95E-04	23	38	751,5	1	9
20	15,9038	1,78E-04	4,10E-03	-7,33E-04	23	38	751,5	1	10
21	15,9038	2,34E-04	4,10E-03	-8,07E-04	23	38	751,5	1	9
22	15,9038	2,88E-04	4,50E-03	-1,00E-03	23	38	751,5	2	7
23	15,9038	3,64E-04	5,00E-03	-1,10E-03	23	38	751,5	2	10
24	15,9038	4,04E-04	5,10E-03	-1,10E-03	23	38	751,5	3	9
25	15,9038	4,64E-04	5,00E-03	-1,20E-03	23	38	751,5	1	10
26	15,9038	5,24E-04	1,02E-02	-1,20E-03	23	38	751,5	1	9

Tabla B.2: Resultados parámetros a 23°C

Vapli	Uo	A	B_pos	B_neg	T (°C)	H (%)	P (hPa)	n_pos	n_neg
16	15,8594	6,32E-05	5,00E-04	-3,30E-04	24	34	751	3	6
17	15,8594	9,20E-05	5,00E-04	-4,20E-04	24	34	751	2	8
18	15,8594	1,24E-04	5,00E-04	-4,87E-04	24	34	751	1	9
19	15,8594	1,52E-04	1,95E-03	-6,23E-04	24	34	751	1	9
20	15,8594	1,95E-04	3,50E-03	-6,84E-04	24	34	751	1	10
21	15,8594	2,39E-04	3,50E-03	-8,18E-04	24	34	751	1	12
22	15,8594	2,87E-04	3,50E-03	-8,96E-04	24	34	751	1	12
23	15,8594	3,48E-04	7,30E-03	-1,10E-03	24	34	751	1	7
24	15,8594	3,86E-04	7,95E-03	-1,10E-03	24	34	751	1	9
25	15,8594	4,70E-04	9,98E-03	-1,30E-03	24	34	751	1	9
26	15,8594	5,08E-04	1,00E-02	-1,30E-03	24	34	751	1	10

Tabla B.3: Resultados parámetros a 24°C

Vapli	Uo	A	B_pos	B_neg	T (°C)	H (%)	P (hPa)	n_pos	n_neg
16	15,8036	7,62E-05	2,10E-03	-3,29E-04	25	32	749,7	2	8
17	15,8036	9,42E-05	2,50E-03	-3,83E-04	25	32	749,7	2	9
18	15,8036	1,25E-04	2,50E-03	-4,38E-04	25	32	749,7	1	11
19	15,8036	1,61E-04	4,50E-03	-6,31E-04	25	32	749,7	1	8
20	15,8036	2,12E-04	5,00E-03	-7,62E-04	25	32	749,7	1	7
21	15,8036	2,48E-04	5,00E-03	-8,87E-04	25	32	749,7	1	6
22	15,8036	3,01E-04	1,00E-02	-1,00E-03	25	32	749,7	1	6
23	15,8036	3,52E-04	1,00E-02	-1,00E-03	25	32	749,7	1	7
24	15,8036	4,11E-04	1,00E-02	-1,20E-03	25	32	749,7	1	8
25	15,8036	4,53E-04	1,00E-02	-1,20E-03	25	32	749,7	1	9
26	15,8036	5,29E-04	1,00E-02	-1,40E-03	25	32	749,7	2	9

Tabla B.4: Resultados parámetros a 25°C

Vapli	Uo	A	B_pos	B_neg	T (°C)	H (%)	P (hPa)	n_pos	n_neg
16	15,7568	6,95E-05	3,30E-03	-3,73E-04	26	30	749	3	6
17	15,7568	8,96E-05	1,30E-03	-4,85E-04	26	30	749	2	8
18	15,7568	1,31E-04	4,00E-03	-5,29E-04	26	30	749	2	8
19	15,7568	1,55E-04	4,00E-03	-6,34E-04	26	30	749	1	10
20	15,7568	1,94E-04	4,00E-03	-8,12E-04	26	30	749	1	9
21	15,7568	2,38E-04	4,00E-03	-8,58E-04	26	30	749	1	10
22	15,7568	2,79E-04	4,50E-03	-9,43E-04	26	30	749	2	10
23	15,7568	3,59E-04	7,50E-03	-1,10E-03	26	30	749	1	8
24	15,7568	4,06E-04	1,00E-02	-1,20E-03	26	30	749	1	9
25	15,7568	4,59E-04	1,50E-02	-1,30E-03	26	30	749	1	9
26	15,7568	5,31E-04	2,00E-02	-1,30E-03	26	30	749	1	9

Tabla B.5: Resultados parámetros a 26°C

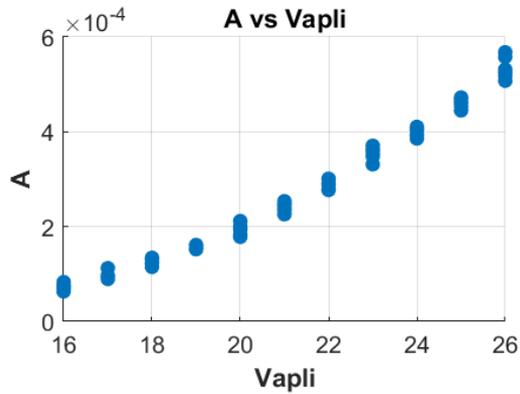
Vapli	Uo	A	B_pos	B_neg	T (°C)	H (%)	P (hPa)	n_pos	n_neg
16	15,7146	7,47E-05	1,70E-03	-4,16E-04	27	29	748,6	2	8
17	15,7146	9,67E-05	1,90E-03	-4,39E-04	27	29	748,6	1	8
18	15,7146	1,33E-04	1,80E-03	-5,27E-04	27	29	748,6	1	10
19	15,7146	1,60E-04	2,10E-03	-5,85E-04	27	29	748,6	1	10
20	15,7146	1,99E-04	3,50E-03	-6,97E-04	27	29	748,6	1	10
21	15,7146	2,46E-04	4,00E-03	-8,38E-04	27	29	748,6	1	12
22	15,7146	3,01E-04	5,00E-03	-1,10E-03	27	29	748,6	1	8
23	15,7146	3,52E-04	5,00E-03	-1,10E-03	27	29	748,6	1	10
24	15,7146	4,10E-04	1,05E-02	-1,20E-03	27	29	748,6	1	8
25	15,7146	4,64E-04	9,50E-03	-1,20E-03	27	29	748,6	1	9
26	15,7146	5,68E-04	1,05E-02	-1,50E-03	27	29	748,6	2	9

Tabla B.6: Resultados parámetros a 27°C

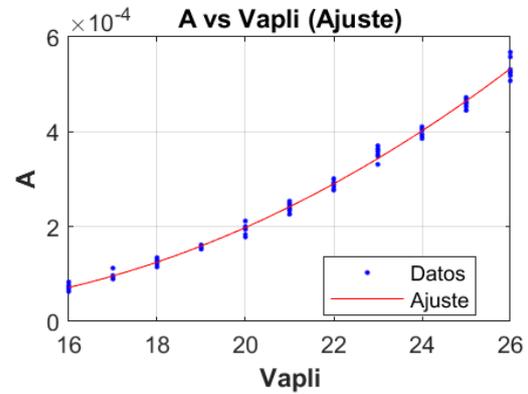
Vapli	Uo	A	B_pos	B_neg	T (°C)	H (%)	P (hPa)	n_pos	n_neg
16	15,68	8,30E-05	1,80E-03	-3,59E-04	28	32	748,7	2	7
17	15,68	1,13E-04	2,30E-03	-4,65E-04	28	32	748,7	1	8
18	15,68	1,34E-04	2,50E-03	-4,96E-04	28	32	748,7	1	9
19	15,68	1,61E-04	2,70E-03	-6,25E-04	28	32	748,7	1	10
20	15,68	2,00E-04	3,60E-03	-6,32E-04	28	32	748,7	1	10
21	15,68	2,54E-04	3,75E-03	-8,20E-04	28	32	748,7	1	11
22	15,68	2,92E-04	8,50E-03	-1,10E-03	28	32	748,7	1	6
23	15,68	3,71E-04	8,50E-03	-1,20E-03	28	32	748,7	1	6
24	15,68	3,94E-04	1,15E-02	-1,30E-03	28	32	748,7	1	5
25	15,68	4,72E-04	1,30E-02	-1,30E-03	28	32	748,7	1	8
26	15,68	5,58E-04	1,50E-02	-1,40E-03	28	32	748,7	1	9

Tabla B.7: Resultados parámetros a 28°C

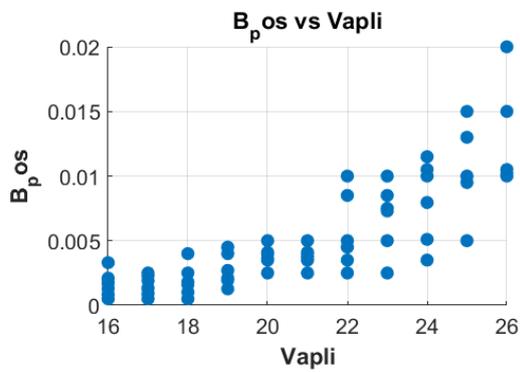
C Programación modelo MATLAB



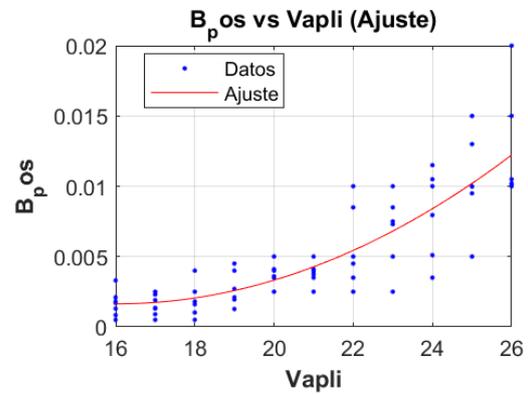
(a) A vs V_{apli}



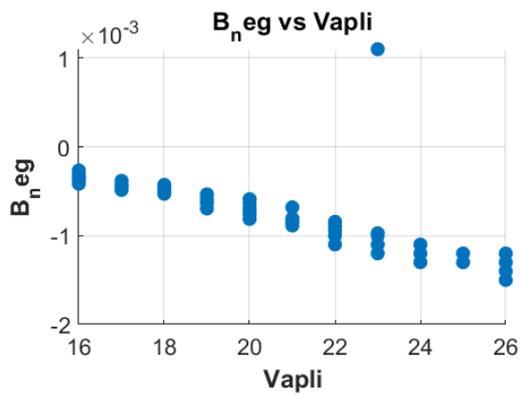
(b) Ajuste A vs V_{apli}



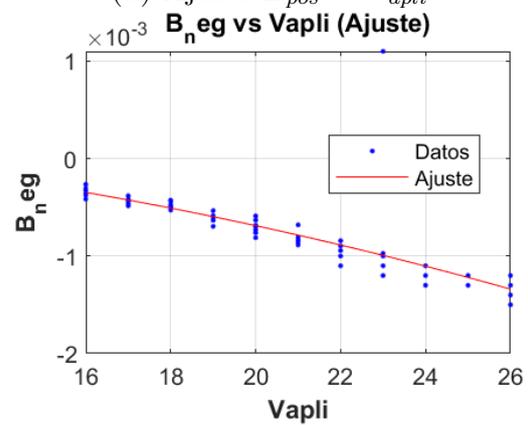
(c) B_{pos} vs V_{apli}



(d) Ajuste B_{pos} vs V_{apli}



(e) B_{neg} vs V_{apli}



(f) Ajuste B_{neg} vs V_{apli}

Figura C.1: Parámetros vs V_{apli}

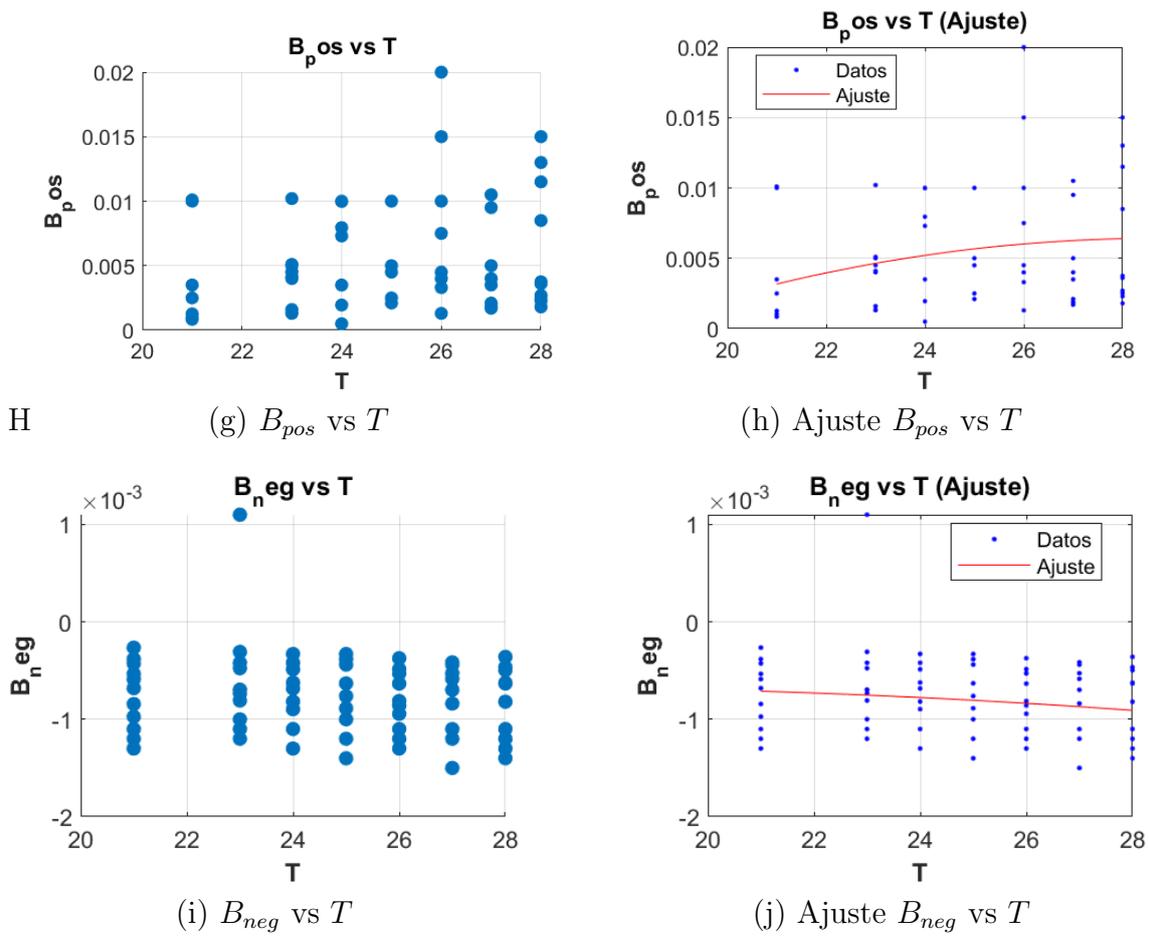


Figura C.2: Parámetros vs T

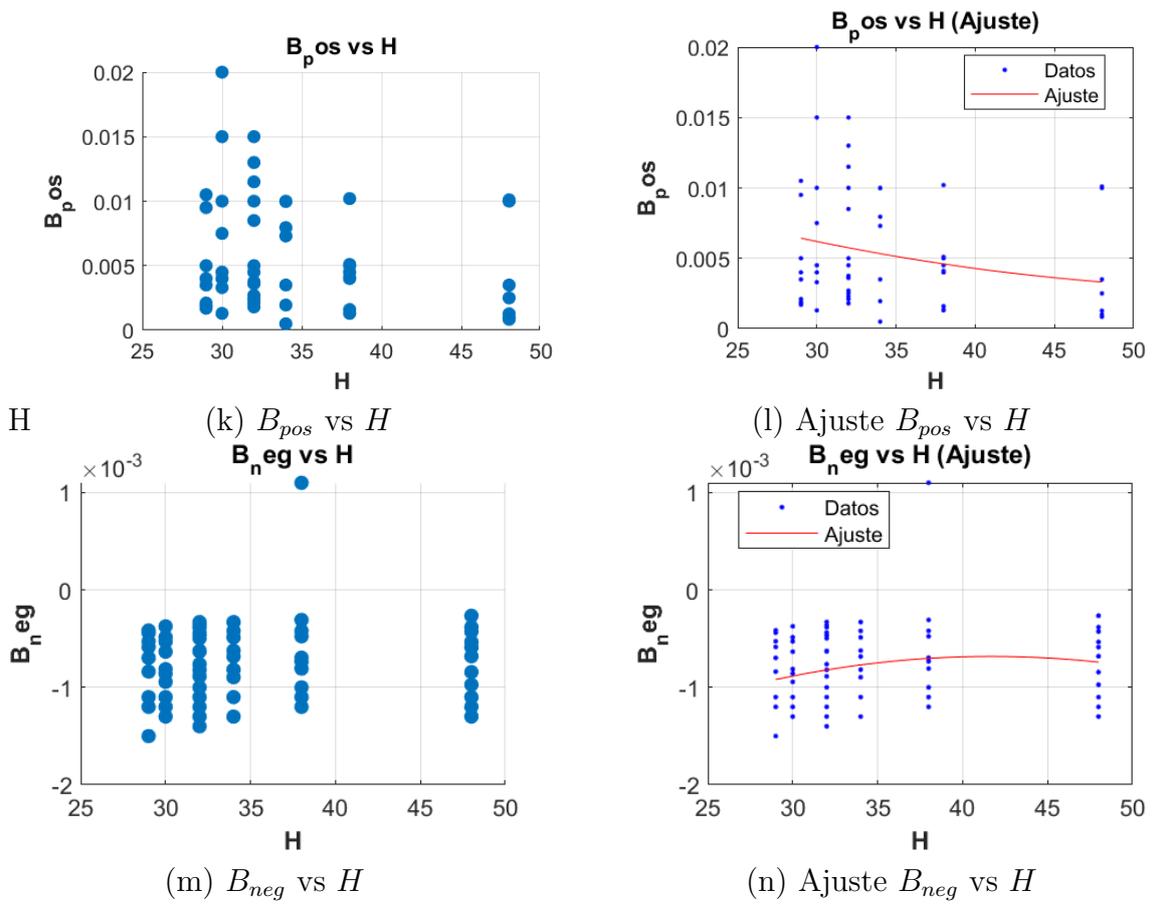


Figura C.3: Parámetros vs H

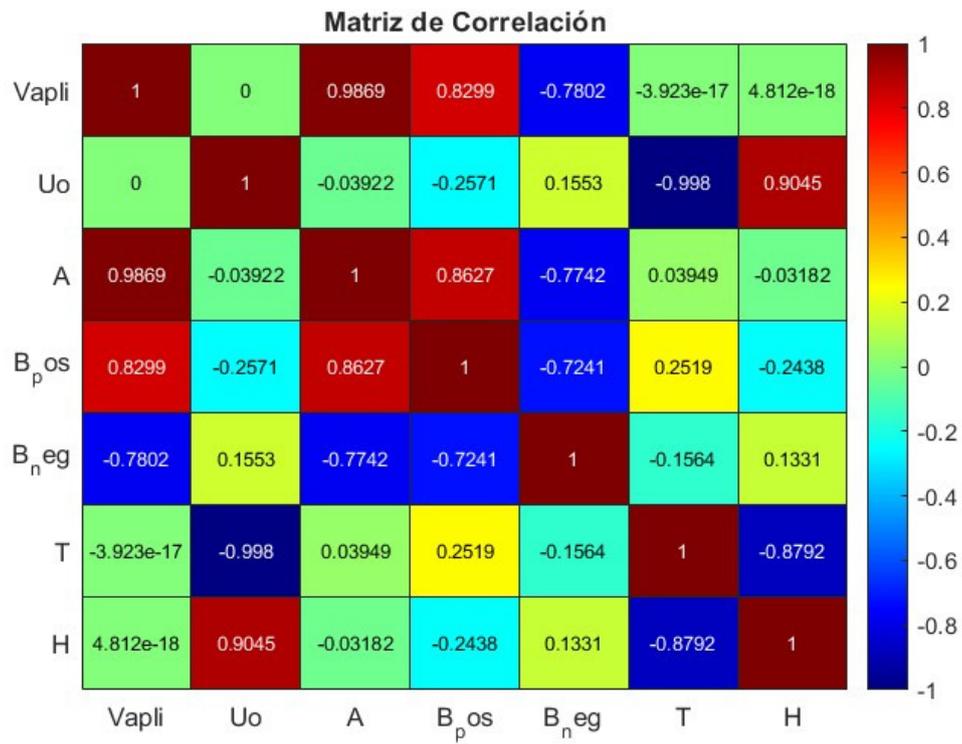


Figura C.4: Matriz de correlación

Tabla C.1: Áreas del Trabajo de Grado

Título del Trabajo:		MODELACIÓN DEL EFECTO CORONA EN UN CONDUCTOR	
Restricciones múltiples (dos o más)	Accesibilidad		Estética
	Códigos	Sección 2.2	Construtibilidad
	Costos		Ergonomía
	Extensibilidad	Sección 4.3	Funcionalidad
	Interoperabilidad		Consideraciones Legales
	Mantenibilidad		Manufacturabilidad
	Mercadeo		Política
	Regulaciones		Cronogramas
	Normativas	Sección 4.2.1	Sostenibilidad
	Usabilidad		Otros:
Normas relevantes (dos o más)	4-2013 - IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques		IEEE Standard Definitions of Terms Relating to Corona and Field Effects of Overhead Power Lines
Elementos del proceso	Identificación de oportunidades		Generación de soluciones múltiples
	Desarrollo de requerimientos		Evaluación de soluciones
	Procesos iterativos	Sección 2.2	Consideración de riesgos
	Realizar compromisos o tratos		
Basado en trabajos anteriores	Protecciones		Iluminación
	Optimización de sistemas		Alta Tensión
	Energías alternativas		Distribución
	Máquinas eléctricas		Otros temas
			Sección 1, 2