



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO INGENIERÍA ELÉCTRICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO A ESCALA PARA EL ESTUDIO
DEL EFECTO CORONA Y MEDICIÓN DE SUS PÉRDIDAS SEGÚN
DIVERSAS CONDICIONES Y CALIDAD DEL AIRE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

RODRIGO FERNANDO SABAJ SAAVEDRA

**PROFESOR GUÍA
ERNESTO BIANCHI SOUTER**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
NELSON MORALES OSORIO
RODRIGO PALMA BENHKE**

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: RODRIGO SABAJ SAAVEDRA
ENERO 2015
PROF. GUÍA: ERNESTO BIANCHI SOUTER

IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO A ESCALA PARA EL ESTUDIO DEL EFECTO CORONA Y MEDICIÓN DE SUS PÉRDIDAS SEGÚN DIVERSAS CONDICIONES Y CALIDAD DEL AIRE

El efecto corona es un fenómeno asociado a la conductividad del aire circundante a un conductor sometido a alta tensión que conlleva campos eléctricos muy intensos, lográndose la ruptura dieléctrica del aire. El inicio del fenómeno no solo depende de este último valor, sino de diversas condiciones atmosféricas, como temperatura, presión y humedad; condiciones ambientales, como presencia de sales y polución; y fallas en el conductor que originan un efecto punta.

En este trabajo se presenta un modelo a escala que permite lograr el efecto corona con una tensión reducida en conductores desnudos de pequeño calibre. La alimentación se realiza a través de un transformador de potencial variable que se opera hasta los 40 [kV] mientras que los conductores se colocan a 0,2 [m] de altura dentro de una caja acrílica de 1,2 [m] de largo, 0,4 [m] de ancho y 0,4 [m] de alto, en la cual yace una placa metálica conectada a tierra y que simula el efecto de ésta. La caja cuenta con una tapa que permite aislar el aire en su interior, pudiéndose alterar la atmósfera que rodea al conductor, logrando seis condiciones: normal, conductor rociado con agua, conductor rociado con agua y sal, atmósfera con vapor de agua, atmósfera cálida y atmósfera con presencia de humo. Para detectar el fenómeno corona, se diseña una simple pero efectiva antena parabólica que se coloca en un costado de la caja. La señal de tensión inducida en ella es mostrada por un osciloscopio y permite deducir el comienzo de la descarga por las alteraciones que se generan en ella.

En la situación normal se logra la descarga corona en la situación ideal, es decir, cuando el campo eléctrico entorno al conductor es equivalente a la ruptura dieléctrica del aire en los cinco conductores utilizados. La situación más adversa es la presencia de vapor de agua, que disminuye entre un 50% a un 60% el inicio del fenómeno, mientras que en aire cálido aumenta un 20%. Para las pérdidas, calculadas a través de la conductividad determinada experimentalmente, el caso con vapor aumenta entre 9 a 11 veces las pérdidas con respecto a la situación normal, alcanzando los $50 \left[\frac{W}{m} \right]$ a los 25 [kV] y las restantes situaciones presentan pérdidas muy similares a las del caso normal, con valores de $20 \left[\frac{W}{m} \right]$ a 40 [kV]. Así, la condición ambiental más adversa es la humedad y presencia de neblina, lo que implica poner atención en las líneas que yacen en zonas costeras o valles con muy baja altitud geográfica. Las pérdidas, según la teoría, difieren solo en este último caso, mientras que en los demás, se obtiene una aproximación aceptable y comparando con un caso real para una línea de 500 [kV], se obtienen resultados en el mismo rango de valores.

*A mi abuelita,
quien sacrificó su vejez por mí,
quien me crió, cuidó y educó siendo que no era su deber.
Sin ti, quizás, esto no sería realidad.*

Agradecimientos

A Dios, a mi Patria y, sobre todo, a quien va dedicado este trabajo de título, doña Aurora Gamelli Vergara. Dudo que sea posible estampar por escrito el agradecimiento hacia su persona.

A mi profesor guía, don Ernesto Bianchi Souter, por su constante apoyo, por su tiempo y por no escatimar en recursos propios para que esta memoria pudiese llevarse a cabo y, así, sortear todos los inconvenientes que surgieron durante el desarrollo de mi trabajo de título. ¡A pesar de todo, lo logramos!

A todas y cada una de aquellas personas que han aportado con su amistad, con su compañía, con su tiempo y/o con su preocupación tanto en estos seis años de estudios universitarios como en todos los años de mi infancia y juventud previos.

En cuanto a la memoria propiamente tal, se agradece a la empresa AGELEC por facilitar y transportar el transformador de potencial necesario y fundamental para realizar este trabajo. También al Departamento de Ingeniería Eléctrica, quien a través de don Nelson Morales Osorio, ayudó a financiar algunos de los materiales e instrumentos utilizados. Finalmente, a la unidad de ensayos eléctricos del IDIEM, liderada por don Mario Vergara, quien facilitó su laboratorio para realizar las primeras pruebas, necesarias para analizar la factibilidad de montar el modelo a escala finalmente creado.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Alcances.....	2
1.4 Estructura.....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Descripción del efecto corona.....	4
2.1.1 Procesos elementales en la descarga.....	4
2.1.2 Mecanismo de formación de descarga.....	6
2.1.3 Consecuencias del efecto corona y fallas asociadas.....	7
2.2 Variables que influyen en el efecto corona.....	8
2.2.1 Gradiente superficial.....	8
2.2.2 Estado de la superficie del conductor.....	8
2.2.3 Condiciones atmosféricas y densidad relativa del aire.....	9
2.2.4 Efecto del agua sobre el conductor.....	10
2.2.5 Factores geométricos.....	10
2.2.6 Material del conductor.....	10
2.2.7 Tipo de tensión y frecuencia.....	11
2.3 Corrección del efecto corona.....	11
2.4 Pérdidas por efecto corona.....	12
2.4.1 Método de F. W. Peek.....	13
2.4.2 Método de Peterson.....	13
2.4.3 Método de Electricité de France.....	15
2.5 Campo eléctrico de una línea monopolar.....	18
2.6 Modelación teórica de corriente de fuga por efecto corona.....	20
3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO A ESCALA.....	23
3.1 Maqueta y alimentación eléctrica.....	23
3.2 Detección del efecto corona.....	28

3.3	Modificación de variables atmosféricas y ambientales	30
3.4	Operación y medidas de seguridad.....	31
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	33
4.1	Detección del efecto corona.....	33
4.2	Resultados de las mediciones experimentales	34
4.2.1	Condición normal	35
4.2.2	Conductor rociado con agua.....	38
4.2.3	Conductor rociado con agua y sal depositada	40
4.2.4	Conductor con vapor de agua.....	42
4.2.5	Conductor en ambiente cálido	44
4.2.6	Conductor con humo	46
4.2.7	Resumen de resultados.....	47
4.3	Pérdidas por efecto corona.....	49
4.3.1	Resultados experimentales	49
4.3.2	Comparación con resultados teóricos según método de Peek	51
4.3.3	Comparación con resultados teóricos según método de Peterson	53
4.3.4	Comparación con resultados teóricos según método de Electricité de France.....	53
4.3.4	Comparación con cálculos para líneas reales	55
4.4	Fuentes de error del modelo implementado.....	55
5.	CONCLUSIONES	57
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	60

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Variación del campo eléctrico para polaridad negativa.....	6
Ilustración 2: Variación de campo eléctrico para polaridad positiva.....	7
Ilustración 3: Esquema conductor fasciculado	11
Ilustración 4: Función de Peterson entre 0,6 y 2,6	15
Ilustración 5: Función de Peterson entre 1 y 21	15
Ilustración 6: Valor de P_0 en un conductor seco.....	16
Ilustración 7: Determinación del parámetro m	17
Ilustración 8: Pérdida específica corona	17
Ilustración 9: Carga imagen para cálculo del campo eléctrico	18
Ilustración 10: Circuito equivalente.....	20
Ilustración 11: Corriente de disipación instantánea teórica	21
Ilustración 12: Corriente de fuga teórica versus tensión aplicada	22
Ilustración 13: Maqueta a diseñar	25
Ilustración 14: Conductores a utilizar	26
Ilustración 15: Elipses y tensores a utilizar	26
Ilustración 16: Extremos de los conductores a utilizar	26
Ilustración 17: Transformador a utilizar	27
Ilustración 18: Control del equipo a utilizar.....	28
Ilustración 19: Corte transversal de la antena.....	29
Ilustración 20: Antena a utilizar	29
Ilustración 21: Estación meteorológica a utilizar	30
Ilustración 22: Pértiga de descarga	31
Ilustración 23: Disposición de los equipos en lugar de trabajo	32
Ilustración 24: Señal detectada sin efecto corona (izquierda) y con efecto corona (derecha)	33
Ilustración 25: Resultados en condiciones normales	36
Ilustración 26: Resultados con conductor rociado con agua	39
Ilustración 27: Resultados con conductor rociado con agua rociada y sal.....	41
Ilustración 28: Resultados con conductor sometido a vapor.....	43
Ilustración 29: Resultados con conductor en aire cálido.....	45
Ilustración 30: Resultados con conductor sometido a la presencia de humo	46
Ilustración 31: Potencia experimental de pérdida corona	50
Ilustración 32: Pérdidas según fórmula de Peek.....	52
Ilustración 33: Pérdidas según fórmula de Peterson.....	54

Índice de tablas

Tabla 1: Valores referenciales de m	9
Tabla 2: Movilidad iónica según material.....	10
Tabla 3: Valores de tensión para alcanzar ruptura dieléctrica del aire	24
Tabla 4: Valores placa del transformador de alta tensión	27
Tabla 5: Características estación meteorológica	30
Tabla 6: Temperatura y humedad de las condiciones atmosféricas logradas	34
Tabla 7: Resumen de resultados para conductores utilizados	48
Tabla 8: Pérdidas en $\left[\frac{W}{m \text{ fase}}\right]$ por efecto corona en una línea de 500 kV	55

Tabla de símbolos utilizados

Magnitud	Símbolo	Valor (si corresponde) y unidad de medida	Señalado en
Energía fotón	E	[J]	2.1.1
Constante de Planck	h	$6,62 \cdot 10^{-34} [J \cdot s]$	2.1.1
Frecuencia	f	[Hz]	2.1.1 , 2.4
Fuerza	\vec{F}	[N]	2.1.1
Carga	q	[C]	2.1.1 , 2.5
Campo eléctrico	\vec{E}	$\left[\frac{N}{C}\right], \left[\frac{kV}{mm}\right]$ o $\left[\frac{kV}{mm}\right]$	2.1.1 , 2.3 , 2.5 , 4.2
Ruptura dieléctrica del aire	g_0	$2,98 \left[\frac{kV}{mm}\right]$	2.2.1 , 2.2.3
Radio del conductor	R	[cm]	2.2.1 , 2.2.3 , 2.4.1 , 2.4.2 2.5
Gradiente crítico visual	E_V	$\left[\frac{kV}{cm}\right]$	2.2.1
Factor de corrección	m	adimensional	2.2.2 , 2.2.3 , 2.2.4 , 2.4.1 , 2.4.2 , 4.2
Densidad relativa	δ	adimensional	2.2.3 , 2.4.1 , 2.4.2
Temperatura	T	[°C]	2.2.3
Presión atmosférica	P	[Pa]	2.2.3
Gradiente crítico iniciación	E_0	$\left[\frac{kV}{cm}\right]$	2.2.3 , 2.4.3
Radio del conductor equivalente con misma capacidad	R_C	[cm]	2.3 , 2.4.3
N° subconductores	n	adimensional	2.3 , 2.4.3
Radio subconductor	r	[cm]	2.3 , 2.4.3
Radio geométrico del haz de subconductores	R_g	[cm]	2.3
Potencia pérdida corona	P	$\left[\frac{kW}{km \cdot fase}\right]$	2.4 , 4.3
Distancia efectiva entre fases	D	[cm]	2.4.1 , 2.4.2
Tensión efectiva fase neutro	U	[kV]	2.4.1 , 2.4.2 , 3.1, 4.2 , 4.3
Tensión crítica disruptiva	U_D	[kV]	2.4.1
Tensión característica por fase	e_d	[kV]	2.4.2
N° hebras exterior del conductor	n_h	adimensional	2.4.2
Radio hebra del conductor	R_h	[cm]	2.4.2
Factor de Peterson	ϕ	adimensional	2.4.2
Factor pérdida de potencia	P_0		2.4.3
Gradiente máximo en conductor	E_m	$\left[\frac{kV}{cm}\right]$	2.4.3

Magnitud	Símbolo	Valor (si corresponde) y unidad de medida	Señalado en
Radio del conductor a potencial cero de la línea coaxial equivalente	R_0	[cm]	2.4.3
Radio medio de emigración de la carga espacial	ρ	[cm]	2.4.3
Pérdida específica corona	P_e		2.4.3
Distancia al conductor, usada por Ley de Gauss	r	[m]	2.5
Largo de la superficie encerrada por Ley de Gauss	L	[m]	2.5
Permitividad del aire	ε_0	$8.85 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$	2.5
Altura conductor con respecto a tierra	h	[cm], [m]	2.3, 2.5, 3.1
Diámetro conductor	ϕ	[m]	2.5, 3.1
Amplitud tensión instantánea	u	[V]	2.6
Amplitud corriente instantánea de disipación	i_D	[A]	2.6
Frecuencia angular	ω	$\left[\frac{rad}{s} \right]$	2.6
Tiempo	t	[s]	2.6
Conductancia de fuga	λ_f	[nS]	2.6, 4.2
Conductancia corona	λ_C	[nS]	2.6, 4.2
Conductancia de disipación	λ_D	[nS]	2.6, 4.2
Función escalón	f_E	adimensional	2.6
Corriente efectiva	I_{ef}	[A]	2.6

INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Chile, en su amplia y angosta geografía, presenta diversos tipos de climas, a través de sus miles de kilómetros de longitud y sus escasos kilómetros de ancho. En el norte se presenta el desierto más árido del mundo y en el sur, una patagonia muy lluviosa; en la zona costera, presente en todo Chile, se observa una gran humedad y alta concentración salina, mientras que en la cordillera, frío, nieve y una menor presión atmosférica.

Por otro lado, los dos sistemas eléctricos nacionales deben recorrer, a través de sus líneas de transmisión, largas distancias. En el sistema interconectado del norte grande, comienzan en la zona costera, donde se ubican los centros de generación y deben llegar a elevadas alturas geográficas para alimentar los consumos propios de la minería. En el sistema interconectado central, recorren desde Taltal hasta Chiloé, cruzando por los diversos paisajes que Chile ofrece.

Se podría creer que las distintas realidades atmosféricas no afectan a la transmisión eléctrica. Sin embargo, la realidad es distinta, puesto que los diversos agentes ambientales como la humedad, polución, concentración salina, etc. van acortando la vida útil del conductor y de las cadenas que los soportan. Además, varían el valor de la ruptura dieléctrica del aire, haciéndolo más propenso a la conducción de la electricidad.

Relacionado con esto último se encuentra el efecto corona con sus descargas parciales entorno a los conductores y aislaciones que, junto con presentar pérdidas, dañan las distintas aislaciones, con el riesgo de producir alguna falla en la línea, lo cual podría interrumpir el suministro eléctrico en una amplia zona. Por esto es importante conocer qué lugares son más propensos al efecto corona para realizar las mantenciones respectivas que eviten tener que tomar acciones reactivas en vez de preventivas.

Además, el fenómeno corona produce otros efectos como interferencia en las telecomunicaciones, como por ejemplo en la radiodifusión, y un ruido característico que puede ser molesto para las personas que viven cerca de la línea de transmisión si la intensidad del efecto es elevada. De esta forma, puede afectar incluso a la calidad de vida de las personas, las cuales realizarán sus reclamos respectivos, siendo necesario realizar los trabajos correspondientes para reducir el fenómeno.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar experimentalmente la forma en que las condiciones atmosféricas, el tipo de conductor y el diámetro de éste afectan el inicio del fenómeno corona. Una vez lograda la descarga corona, se busca estudiar cómo afectan dichas variables en la intensidad del fenómeno, evaluando las pérdidas que se generan.

Para lograr lo señalado, se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Describir teóricamente el fenómeno conocido como efecto corona;
- Diseñar un modelo a escala que permita estudiar el efecto corona para diversos tipos de configuraciones y estado del aire ambiente;
- Montar dicho modelo y diseñar la forma de detectar el inicio de la descarga corona;
- Realizar mediciones experimentales para las distintas condiciones atmosféricas, consistentes en medir la corriente de disipación en la línea a escala;
- Determinar a partir de las curvas corriente de disipación efectiva versus tensión efectiva, la conductividad del aire para las diversas situaciones;
- Calcular, a partir de dicha conductividad, la potencia de pérdida por efecto corona en función de la tensión;
- Comparar resultados con cálculos teóricos y situaciones reales y
- Concluir qué zonas del país son más propensas al efecto corona.

1.3 Alcances

Este trabajo estudiará el efecto corona de manera experimental con un laboratorio en que se emulará una línea de alta tensión en una versión a escala. Se realizará considerando una línea monopolar sometida a una tensión alterna variable, la cual estará en un volumen que pueda aislarse.

El trabajo quedará acotado a lo señalado anteriormente y no considerará el estudio del efecto corona en configuraciones reales de líneas de alta tensión, donde el campo eléctrico se vería alterado por las otras fases o por la existencia de un segundo circuito.

Dado los recursos e infraestructura disponible, la presión atmosférica no se podrá incluir entre las variables, ya que no se cuenta con una cámara hipo o hiperbárica que pueda modificarla. De esta forma se variará la temperatura y humedad de forma simple y general, sin una gran precisión, pues tampoco se cuenta con los recursos para lograrla. Entre las variables ambientales a considerar se estudiará la concentración salina y el humo, las cuales se podrían considerar como variables binarias, es decir, se estudiarán los casos con existencia de ellas y con aire limpio.

1.4 Estructura

Este trabajo se expondrá en cuatro capítulos más. En el capítulo dos se realizará una exposición de la teoría asociada al fenómeno corona, explicando su origen físico, mecanismos de formación de descarga y las variables que influyen en el efecto. Se mostrarán, también las fórmulas empíricas que entregan las pérdidas por este fenómeno. Además, se mostrará el cálculo del campo eléctrico entorno a un conductor sobre un plano de tierra en función de la tensión a la cual está sometido y la modelación en forma de circuito del modelo que se implementará.

En el tercer capítulo se mostrará la metodología utilizada tanto para realizar las mediciones experimentales a escala como para detectar la descarga corona. Se diseñará un modelo que pueda alimentarse con baja tensión y que, a través de un transformador, la eleve a niveles de tensión que permita apreciar descargas parciales en el aire circundante, el cual se podrá ir variando para tenerlo en condiciones limpias, con humedad, con concentración salina, con polución etc. según las condiciones en que se encuentren las líneas de transmisión a estudiar.

En el siguiente capítulo se analizarán los resultados de las mediciones con las comparaciones necesarias para establecer las relaciones entre el efecto corona y las variables estudiadas, considerando principalmente el comienzo del efecto y las pérdidas que éste genera. Para las pérdidas experimentales se mostrará una nueva forma de cálculo, dependiente de la conductividad del aire determinada con las mediciones realizadas.

Finalmente, en el último capítulo se presentarán las conclusiones del trabajo a la luz de los resultados obtenidos. Se analizará si el trabajo presentó los resultados esperados y se indicará en qué zonas geográficas del país dónde se deben enfocar los esfuerzos para combatir el efecto corona, según las condiciones atmosféricas más adversas.

Capítulo 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Descripción del efecto corona

El efecto corona es un fenómeno asociado a la conductividad del medio gaseoso que rodea un conductor sometido a una alta tensión, lo que conlleva campos eléctricos intensos que provocan la ruptura dieléctrica del aire, transformándolo en un medio conductor. La descarga corona corresponde a una descarga parcial en el gas en una zona limitada del espacio, por lo que no significa la pérdida completa de las propiedades aislantes del gas, es decir, el resto del gas conserva sus propiedades dieléctricas originales. Este efecto recibe su nombre debido al efecto luminoso que se genera alrededor del conductor, formándose una aureola azulada pálida.

2.1.1 Procesos elementales en la descarga ^{[1][2]}

En el aire circundante se pueden producir procesos que contribuyen a que se produzca la descarga como otros que la retardan o detienen.

2.1.1.1 Procesos favorables a la descarga

a) Fotoionización

Los diversos tipos de radiaciones pueden infundir energía en los electrones según la energía que posee un fotón, dada por

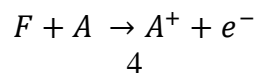
$$E = h \cdot f \quad (1)$$

Con

h : constante de Planck equivalente a $6,626 \cdot 10^{-34} [J \cdot s]$ y

f : frecuencia del fotón.

Si dicha energía supera la energía de ionización del átomo se produce la liberación de un electrón y se obtiene un ión positivo. Esquemáticamente, si F representa a un fotón, A a un átomo y e^- un electrón:



b) Ionización por choque

Los electrones se mueven según:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad (2)$$

Donde

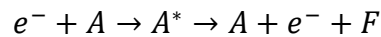
\vec{F} : fuerza que rige el movimiento;

q : carga en movimiento y

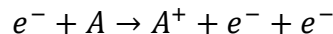
\vec{E} : campo eléctrico.

En su movimiento, ellos se encuentran con átomos y moléculas produciéndose choques elásticos, los que conservan la energía cinética, y choques inelásticos, donde hay pérdidas de energía cinética y la posibilidad de ocurrencia de dos fenómenos.

El primero de ellos es la excitación del átomo neutro, donde sus electrones aumentan de nivel energético. Como este estado es inestable, el electrón vuelve al orbital original y libera un fotón.



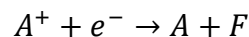
La otra opción es la ionización, donde se libera otro electrón, obteniéndose un ion positivo y dos electrones libres.



2.1.1.2 Procesos desfavorables a la descarga

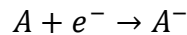
a) Recombinación o neutralización

Un electrón libre puede encontrarse con ión positivo, neutralizando la carga y liberando un fotón.



b) Ionización negativa

Un electrón puede ligarse a un átomo neutro para así obtener una configuración más estable, como es el caso de los halógenos, obteniéndose un ión negativo.



Aunque se mantiene la carga, un ión posee una movilidad bastante menor que un electrón ya que tiene mayor masa.

2.1.2 Mecanismo de formación de descarga ^{[1][2]}

El proceso de descarga se inicia por los iones y electrones libres que se pueden encontrar en el aire y que son acelerados por el campo eléctrico. Si un electrón impacta a un átomo liberando otro electrón, ambos son acelerados y cada uno tiene la posibilidad de liberar más electrones por choque. Con esto, se puede generar una reacción en cadena que provoque la avalancha, siendo necesario que la cantidad de electrones liberados sea mayor que los que terminan recombinándose con otros iones. Además, se considera que el movimiento de iones es mucho más lento que el de los electrones.

Para que una avalancha se transforme en una descarga se debe alcanzar una cierta magnitud del gradiente de tensión crítico, que depende de la polaridad del conductor. Como la señal es sinusoidal, el fenómeno es diferente en cada semiciclo, por efecto del cambio de polaridad del conductor.

2.1.2.1 Polaridad negativa

En este caso, el campo eléctrico aleja electrones del conductor, generando una avalancha. Algunos de los fotones producidos en esta avalancha impactan al conductor liberando más electrones que crean más avalanchas. Los electrones dejan atrás los iones positivos y, al alejarse, impactan a moléculas neutras formando iones negativos.

El campo se ve alterado por efecto de las concentraciones de carga en el espacio, aumentando cerca del conductor por efecto de la carga positiva lo que provoca que los nuevos electrones libres en la superficie del conductor se recombinen con las cargas positivas antes de multiplicarse. La ionización en la superficie cesa cuando el campo en esa zona disminuye bajo el valor inicial por neutralización de esta carga y por la presencia de la carga negativa más lejos. Al alejarse la carga negativa, vuelven las condiciones iniciales y el proceso se repite.

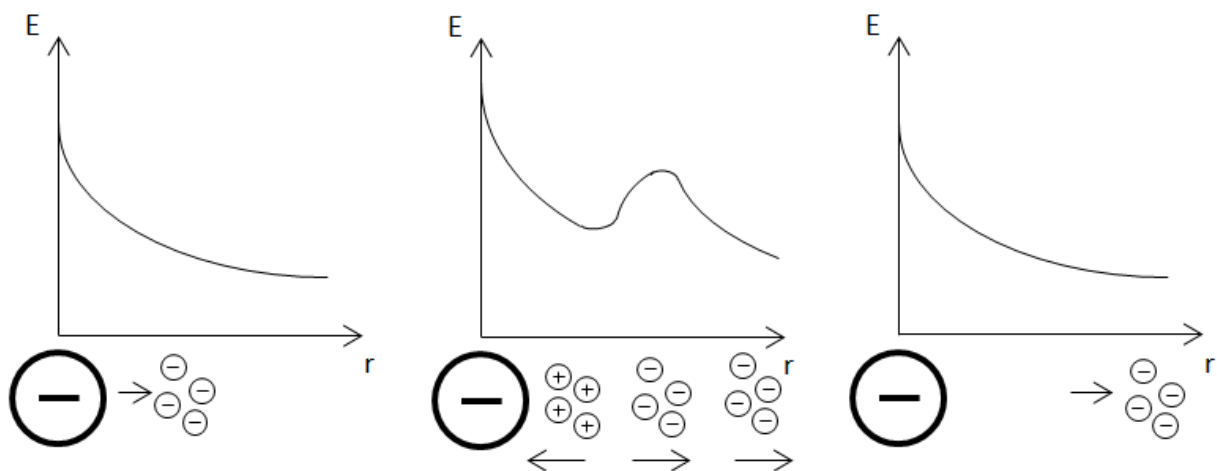


Ilustración 1: Variación del campo eléctrico para polaridad negativa

2.1.2.2 Polaridad positiva

En este caso los electrones libres son acelerados por un campo eléctrico creciente. Si éste es lo suficientemente alto se generan ionizaciones y avalanchas de electrones que se recombinan en el conductor, desprendiéndose fotones que crean avalanchas secundarias sobre los iones que fueron dejados atrás y que actúan como prolongación del conductor. Los iones se desplazan y se restablecen las condiciones iniciales, con lo que el proceso puede repetirse.

En el extremo del canal que se formó por los iones positivos se crean nuevas avalanchas de electrones libres y pares de ión-electrón creados por fotoionización. El canal queda formado por un frente de intensa carga de espacio positiva y un cuerpo de plasma recorrido por una intensa corriente electrónica. El avance se detiene cuando el canal alcanza zonas débiles de campo mientras que los electrones se recombinan o forman iones negativos, ambos alejándose del conductor. Este proceso de ionización se propaga lejos del conductor, con corrientes cuyo valor sube muy rápido y que alcanza amplitudes varias veces mayores que el caso anterior.

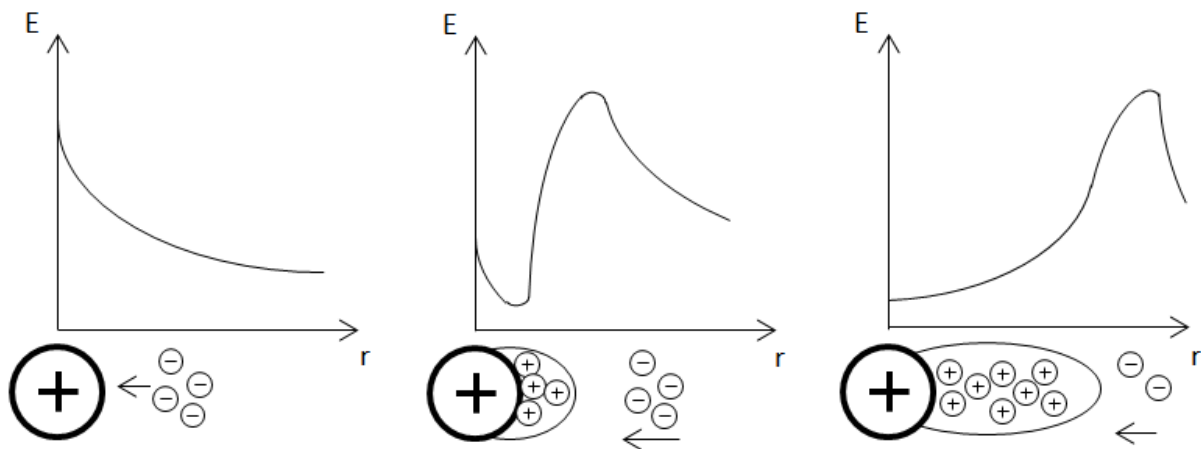


Ilustración 2: Variación de campo eléctrico para polaridad positiva

2.1.3 Consecuencias del efecto corona y fallas asociadas ^{[1][2][3]}

La descarga corona tiene como resultado obvio pérdidas de energía. Junto con la luminosidad que da origen al nombre del efecto, se genera un sonido fácilmente audible. Para las comunicaciones también se tienen efectos negativos pues se observa ruido y radio-interferencia que afecta a las ondas electromagnéticas de radio y televisión.

En el caso de las líneas de transmisión, los efectos negativos son la generación de ácido nitroso, que ocurre en presencia de humedad, el cual puede corroer el conductor cuando el fenómeno es intenso, la degradación de los aisladores poliméricos, grietas en el cemento de los aisladores de porcelana y degradación en la cubierta de las fibras óptica.

La generación del efecto corona puede indicar varias situaciones a corregir como falla de conexiones, instalaciones incorrectas, piezas sueltas, corrosión o erosión, hilos rotos en conductores y contaminación en aisladores, dado que el campo eléctrico es mucho más intenso en aquellas zonas en forma de punta.

2.2 Variables que influyen en el efecto corona

La intensidad del efecto corona depende de los siguientes factores.

2.2.1 Gradiente superficial ^{[1][2][4]}

Si la intensidad del campo en la superficie del conductor es el equivalente a la ruptura dieléctrica del aire, no se producirá una descarga corona, pues los iones no alcanzan a acumularse en una cantidad suficiente para dicha descarga. De esta forma, el gradiente crítico debe extenderse en una zona considerable entorno al conductor para producir la avalancha.

Este valor se denomina gradiente crítico visual o gradiente de iniciación E_V . Es decir, si en la superficie del conductor se tiene dicho gradiente de la intensidad de campo eléctrico, se tiene un gradiente suficiente en una zona determinada para la descarga. Este valor, para un conductor cilíndrico, está dado por la fórmula que propone F. W. Peek:

$$E_V = g_0 \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{R}} \right) \quad (3)$$

Donde

g_0 : ruptura dieléctrica del aire medido a 25 [°C] y 101.325 [Pa] equivalente a 29,8 $\left[\frac{kV}{cm} \right]$ y

R : radio del conductor en centímetros.

Este valor del gradiente de iniciación puede diferir según el estado en que se encuentra la superficie del conductor.

2.2.2 Estado de la superficie del conductor ^{[1][2][3]}

El cálculo del valor anterior se hace considerando conductores cilíndricos, de superficie lisa y perfectamente pulida, del mismo diámetro exterior que el conductor real. Debido a los daños que se pueden presentar en la superficie, el gradiente real es levemente mayor que el calculado y así el conductor real tendrá un gradiente crítico visual un poco menor dado el efecto de concentración de cargas y, por ende, de mayores gradientes presentes en las irregularidades. De

esta forma, la descarga corona siempre comienza en esos puntos y, por ello, se trata de que los conductores no sufran daños durante la construcción o montaje.

Se considera un factor de corrección m , llamado coeficiente de estado de superficie, para el gradiente crítico, con los siguientes valores para el estado del 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: Valores referenciales de m

2.2.3 Condiciones atmosféricas y densidad relativa del aire ^{[1][2][4]}

Como se señaló anteriormente, el valor del gradiente superficial es en condiciones normales de presión y temperatura.

Por un lado, a mayor temperatura, menor es la ruptura dieléctrica del aire, lo que favorece al efecto corona. Esto es debido a un aumento de la trayectoria libre media para la carga.

Por otro lado, a mayor presión, mayor es la ruptura dieléctrica del aire, ya que esto conlleva a una mayor cantidad de aire en el mismo volumen, siendo más difícil la descarga a través de éste.

Así, la densidad relativa del aire en función de dichas variables es:

$$\delta = \frac{P}{339,24 \cdot (T + 273)} \quad (4)$$

Con

P : presión atmosférica en Pascales y

T : temperatura en grados Celsius.

Luego, el valor del gradiente crítico, cuyo valor es el gradiente de iniciación corregido por el estado de la superficie del conductor y la densidad del aire, es:

$$E_0 = g_0 \cdot \delta \cdot m \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot R}} \right) \quad (5)$$

Por otro lado, la influencia de la humedad es sumamente importante, sobre todo cuando el campo eléctrico no es uniforme. Esto se explica por el aumento de la unión de electrones libres, es decir, una mayor electronegatividad, y por el aumento de la absorción de fotones en los canales donde se producen descargas secundarias por fotoionización.

2.2.4 Efecto del agua sobre el conductor ^[1]

El agua proveniente de las precipitaciones o humedad del aire es capaz de formar gotas en la superficie del conductor, presentándose como discontinuidades en él. El agua reduce los niveles de gradiente crítico, provocando de esta forma mayores pérdidas corona y niveles de interferencias superiores. La corrección sobre tales variables se hace a través del coeficiente de superficie m adquiriendo un valor entre 0,3 y 0,5.

2.2.5 Factores geométricos ^{[5][6]}

Además de todo lo anterior, hay factores geométricos que influyen en el efecto corona. Uno de ellos es el radio de curvatura de la línea, ya que mientras menor sea el valor de este, menor es la tensión a la cual comienza la descarga corona, debido a un mayor módulo del campo eléctrico en dicha zona.

La distancia entre conductores también afecta, puesto que a menor distancia, menor es la tensión necesaria para lograr el valor crítico del campo eléctrico. La ubicación de las fases y la presencia de un doble circuito en la línea de transmisión también intervienen en la descarga corona. Se debe tener en cuenta que se presentarán mayores pérdidas en una fase que en las otras por una mayor influencia de los restantes conductores.

Como ya se señaló, las discontinuidades o puntas también afectan al fenómeno, pues el campo eléctrico en dichos lugares es mayor, a causa de una acumulación de carga en esos puntos.

2.2.6 Material del conductor ^[5]

El material constitutivo del conductor también influye en el efecto corona puesto que afecta al valor de la movilidad iónica entorno al conductor.

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

Tabla 2: Movilidad iónica según material

Como se muestra en la tabla anterior, el acero presenta mayor movilidad que los otros materiales, por lo que un conductor de este material será más propenso al efecto corona que un conductor de aluminio y cobre.

2.2.7 Tipo de tensión y frecuencia ^[5]

Los modos de descarga que ocurren en la tensión alterna también ocurren en la tensión continua, la única diferencia radica que la descarga en la tensión alterna ocurre solo en la cresta de la senoide mientras que en el otro caso, el fenómeno es constante.

Por otro lado, en la tensión alterna, el efecto corona depende de su frecuencia pues entre mayor sea esta, mayor será la cantidad de descargas que ocurren por unidad de tiempo.

2.3 Corrección del efecto corona ^{[1][6]}

Para corregir el efecto corona se presentan tres opciones en las líneas de transmisión.

La primera consiste en aumentar la sección del conductor y con esto disminuir el valor del gradiente de iniciación de Peek, sin embargo, esto es poco eficiente y raramente justificable económicamente.

La segunda opción y la más difundida es la utilización de fasciculados, es decir, el reemplazo de un único conductor por dos o más subconductores, con lo que se disminuye el valor máximo del campo eléctrico, pues se aumenta el radio efectivo de la fase.

El radio equivalente, definido como el radio de un único conductor que tendría la misma capacidad del conjunto de subconductores, cumple:

$$R_c = \sqrt[n]{\frac{nr}{R_g}} \cdot R_g \quad (6)$$

Donde

R_g : radio geométrico del haz;

n : número de subconductores y

r : radio del subconductor.

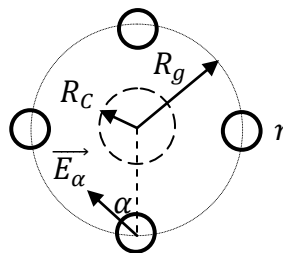


Ilustración 3: Esquema conductor fasciculado

El campo eléctrico queda dado por:

$$|\vec{E}_\alpha| = \left(1 - (n - 1) \frac{2r}{R_g} \cos \alpha\right) \frac{U}{n \cdot r \cdot \ln\left(\frac{2h}{R_c}\right)} \quad (7)$$

Con

h : altura del haz del conductor con respecto a tierra.

Su valor máximo es para $\alpha = 180^\circ$:

$$|\vec{E}_\alpha|_{max} = \left(1 + (n - 1) \frac{2r}{R_g}\right) \frac{U}{n \cdot r \cdot \ln\left(\frac{2h}{R_c}\right)} \quad (8)$$

Mientras que el valor del campo eléctrico de un solo conductor, para $\frac{h}{R} > 100$, es:

$$|\vec{E}|_{max} = \frac{U}{R \cdot \ln\left(\frac{2h}{R}\right)} \quad (9)$$

Así, se puede apreciar la disminución del campo eléctrico y por ende, la disminución del efecto corona.

Una tercera opción es el lavado de las líneas de transmisión, sobre todo en aquellas zonas donde la contaminación se deposita en el conductor, generando las discontinuidades que alteran el gradiente superficial. Adicionalmente se considera el lavado de aisladores tanto en torres como subestaciones, procedimiento que es realizado constantemente a nivel nacional.

2.4 Pérdidas por efecto corona ^{[1][2]}

A causa del efecto corona, se libera energía en diversos procesos como generación de calor, luminosidad, radiación electromagnética, formación de ozono, ruido y vibraciones mecánicas. Toda esta energía liberada proviene del campo eléctrico de la línea y por lo tanto es parte de la energía que se transmite, constituyendo las pérdidas corona.

A continuación, se presentan diversos métodos para calcular las pérdidas corona.

2.4.1 Método de F. W. Peek

Mediante observaciones empíricas y durante la segunda década del siglo XX, Peek desarrolló fórmulas para el estudio cuantitativo del efecto corona en el caso de cilindros paralelos de superficie lisa. La pérdida corona P_{Peek} , en $\left[\frac{kW}{km}\right]$ por fase, queda expresada en la fórmula:

$$P_{Peek} = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{R}{D}} \cdot (U - U_d)^2 \cdot 10^{-5} \quad (10)$$

Con

$$U_d = g_0 \cdot m \cdot R \cdot \delta \cdot \ln\left(\frac{D}{R}\right) \quad (11)$$

Donde

δ : densidad relativa del aire;

f : frecuencia en Hercios;

R : radio del conductor en centímetros;

D : distancia efectiva entre fases en centímetros;

U : tensión fase neutro en kilovoltios;

U_d : tensión crítica disruptiva;

g_0 : ruptura dieléctrica del aire equivalente a $29,8 \left[\frac{kV}{cm}\right]$ y

m : factor de corrección.

Este método es válido para un solo conductor por fase y recomendable para conductores de menos de una pulgada de diámetro.

2.4.2 Método de Peterson

Este método está dividido en etapas. La primera consiste en calcular la tensión característica por fase e_d en kV_{ef} para tres casos, en los cuales se mantienen las denominaciones de las variables del caso anterior:

1. Conductores redondos de superficie lisa y limpia

$$e_d = 48,6 \cdot m \cdot \delta^{2/3} \cdot R \log\left(\frac{D}{R}\right) \quad (12)$$

2. Cables de varios hilos que tienen 12 o más hebras en la capa exterior

$$e_d = 48,6 \cdot m \cdot \delta^{2/3} \frac{\log\left(\frac{D}{c \cdot R_h}\right) + (n_h - 1) \log\left(\frac{D}{R - c \cdot R_h}\right)}{\frac{1}{c \cdot R_h} + \frac{n_h - 1}{2(R - c \cdot R_h)}} \quad (13)$$

Con

$$c = 1 - \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n_h}\right)}{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n_h}} \quad (14)$$

Donde

R_h : radio de la hebra en centímetros y

n_h : número de hebras.

3. Cable con 6 hebras en la capa exterior

$$e_d = 35,47 \cdot m \cdot \delta^{2/3} \cdot R \left(\log\left(\frac{D}{R}\right) + 0,0677 \right) \quad (15)$$

La segunda etapa consiste en el cálculo de la razón entre la tensión fase neutro U y e_d para luego calcular el valor del factor ϕ , función empírica dada por las ilustraciones 4 y 5.

La tercera etapa y final es calcular las pérdidas según

$$P_{Peterson} = \frac{20,95 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot U^2}{\left(\log_{10}\left(\frac{D}{R}\right)\right)^2} \phi \quad (16)$$

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

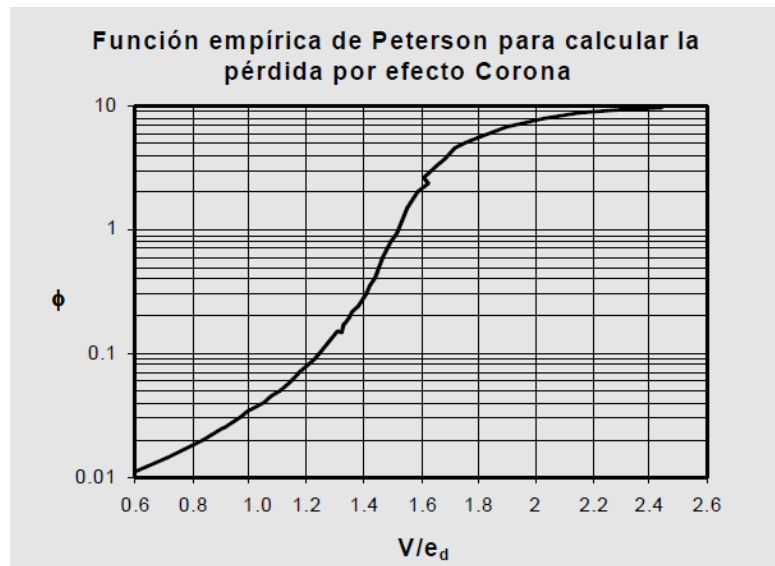


Ilustración 4: Función de Peterson entre 0,6 y 2,6

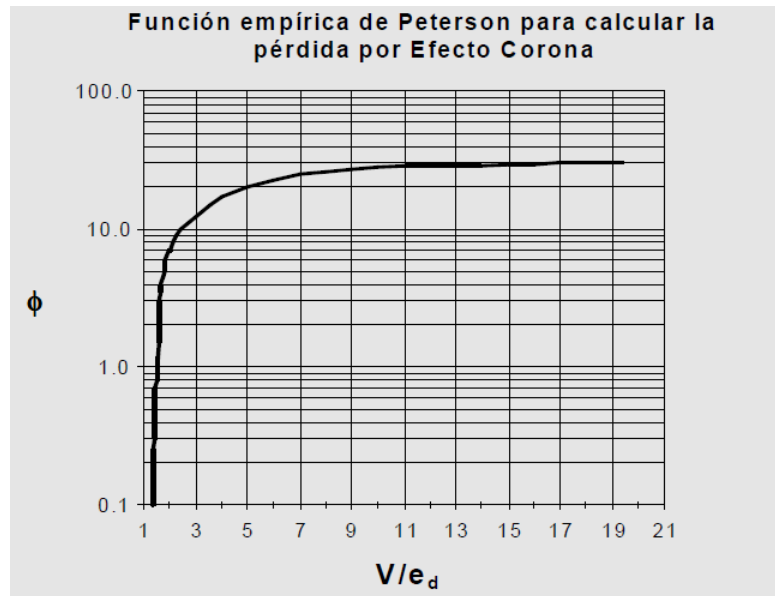


Ilustración 5: Función de Peterson entre 1 y 21

2.4.3 Método de Electricité de France

Los investigadores C. Gary y M. Moreau desarrollaron dos métodos para el cálculo de pérdida corona para conductor tipo en haz.

En el caso de buen tiempo, para un conductor fasciculado de n subconductores por fase, la potencia de pérdida está dada por la siguiente relación empírica

$$P_{EDF} = \frac{P_0 \cdot r^{1,8} \cdot (n + 6)^2 \cdot f}{50} \quad (17)$$

Donde

f : frecuencia en Hercios;

n : número de subconductores;

r : radio del subconductor en centímetros y

P_0 : factor de pérdida de potencia que se obtiene según la ilustración 6, para lo cual se debe calcular el gradiente relativo como razón entre el gradiente máximo del haz y el campo eléctrico crítico del subconductor liso E_0 de la fórmula de Peek.

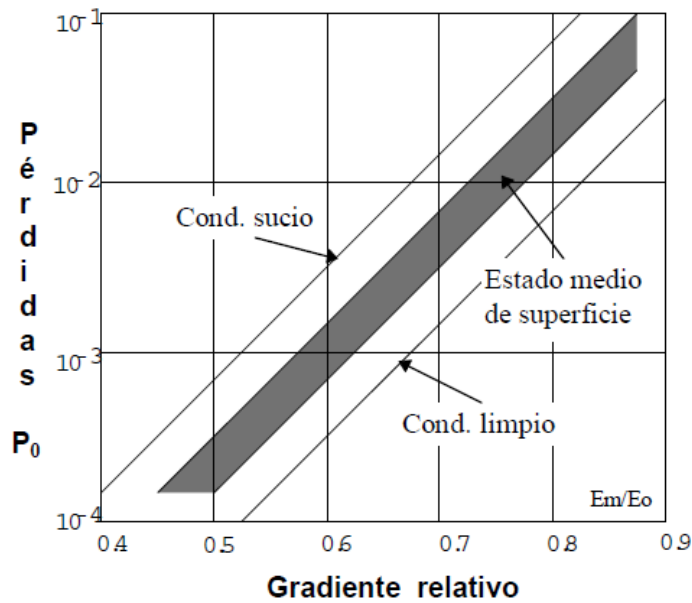


Ilustración 6: Valor de P_0 en un conductor seco.

En el caso de mal tiempo, el método obtenido proviene de un proceso analítico verificado experimentalmente, donde fueron utilizadas configuraciones en haz de 1 a 8 subconductores, con diámetros entre los 2 [cm] y 5,8 [cm] por conductor.

Las pérdidas están dadas por:

$$P_{EDF} = k \cdot P_e \quad (18)$$

Con

$$k = \frac{f}{50} (n \cdot r \cdot \beta)^2 \cdot \frac{\log\left(\frac{R_0}{R_C}\right) \log\left(\frac{\rho}{R_C}\right)}{\log\left(\frac{R_0}{\rho}\right)} \quad (19)$$

Donde las nuevas variables son:

R_0 : radio del conductor a potencial cero de la línea coaxial equivalente; en líneas trifásicas su valor es muy similar a la distancia media geométrica entre fases D .

R_C : radio del conductor equivalente con la misma capacidad, dado por (6);

ρ : radio medio de emigración de la carga espacial, dado por:

$$\rho = 25\sqrt{n \cdot r} \quad (20)$$

y el factor β , cuyo valor es:

$$\beta = 1 + \frac{0,308}{\sqrt{r}} \quad (21)$$

El factor P_e se obtiene de la ilustración 8, que depende del campo eléctrico relativo y del estado de superficie de los conductores m de la ilustración 7, considerando el gradiente relativo como la razón entre el gradiente máximo y el campo eléctrico de Peek.

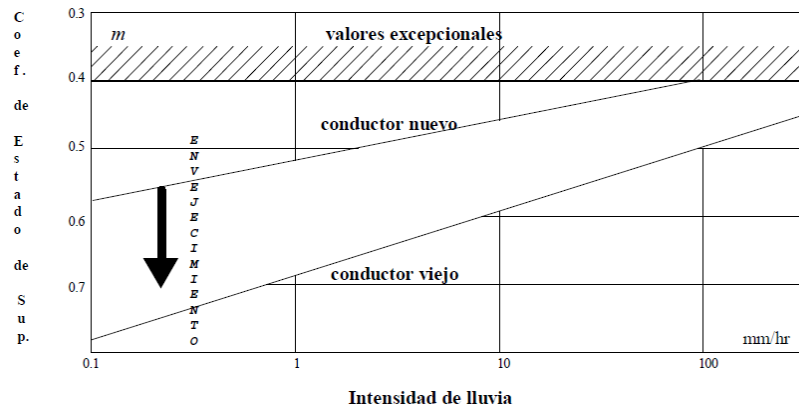


Ilustración 7: Determinación del parámetro m

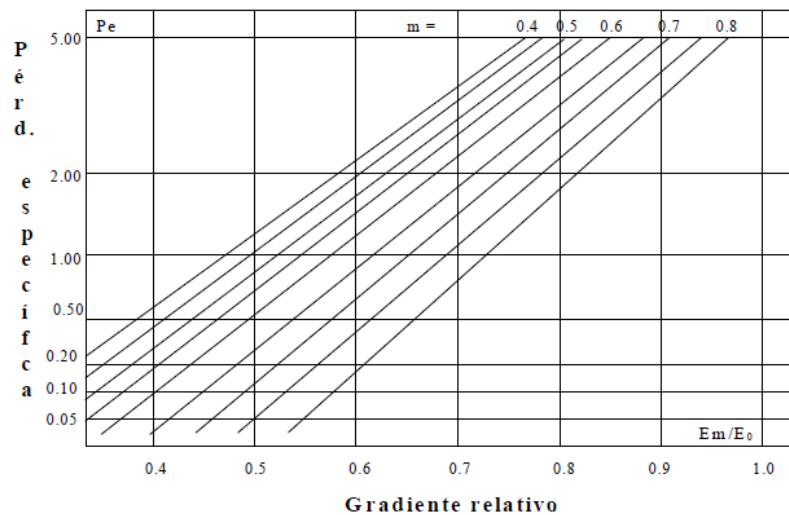


Ilustración 8: Pérdida específica corona

2.5 Campo eléctrico de una línea monopolar ^[7]

Si se considera un único conductor infinito en el espacio, el campo eléctrico generado por este se puede calcular por Ley de Gauss, al considerar un cilindro como superficie gauseana de largo L y radio r , mayor que el radio del conductor R :

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$$

$$|\vec{E}| \cdot 2\pi r L = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$$

$$\vec{E} = \frac{q_{enc}}{2\pi r L \epsilon_0} \hat{r} \quad (22)$$

En el caso de una línea monopolar con tensión U ubicada a una altura h sobre el suelo, el campo eléctrico se puede calcular utilizando el método de carga imagen, pues el suelo está a potencial nulo. De esta forma, el problema se puede resolver considerando dos conductores, donde el segundo está ubicado a una distancia h bajo la superficie y con tensión $-U$, tal como se muestra en la ilustración 9.

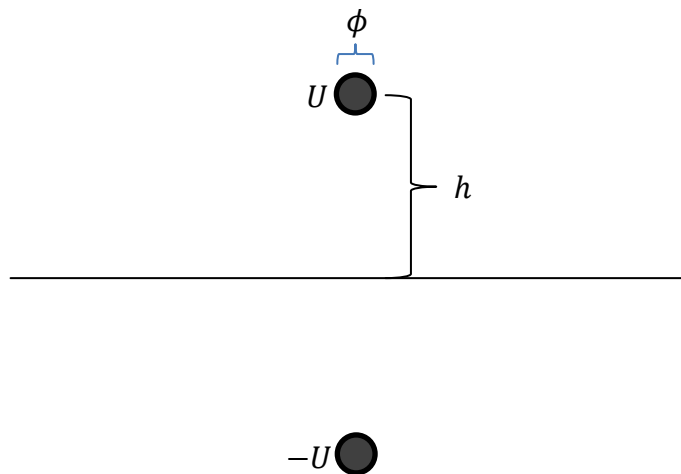


Ilustración 9: Carga imagen para cálculo del campo eléctrico

Tomando el punto medio de la línea recta que une ambos conductores como origen se tiene, por superposición:

$$\vec{E} = -\frac{q_{enc}}{2\pi L \epsilon_0 (h - y)} \hat{j} - \frac{q_{enc}}{2\pi L \epsilon_0 (h + y)} \hat{j} \quad (23)$$

Calculando la diferencia de potencial:

$$\Delta U = -\int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$\begin{aligned}
U - (-U) &= - \int_{-h+R}^{h-R} \left(-\frac{q_{enc}}{2\pi L \epsilon_0 (h-y)} - \frac{q_{enc}}{2\pi L \epsilon_0 (h+y)} \right) dy \\
2U &= \frac{q_{enc}}{2\pi L \epsilon_0} \int_{-h+R}^{h-R} \left(\frac{1}{h-y} + \frac{1}{h+y} \right) dy \\
2U &= \frac{q_{enc}}{2\pi L \epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{h+y}{h-y} \right) \right)_{-h+R}^{h-R} \\
2U &= \frac{q_{enc}}{2\pi L \epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{2h-R}{R} \right) - \ln \left(\frac{R}{2h-R} \right) \right) \\
2U &= \frac{q_{enc}}{\pi L} \epsilon_0 \ln \left(\frac{2h-R}{R} \right) \tag{24}
\end{aligned}$$

Reemplazando el valor de q_{enc} en función del módulo del campo eléctrico:

$$\begin{aligned}
2U &= \frac{2\pi L \epsilon_0 \cdot |\vec{E}|}{\pi L \epsilon_0 \left(\frac{1}{h-y} + \frac{1}{h+y} \right)} \ln \left(\frac{2h-R}{R} \right) \\
|\vec{E}| &= \frac{U}{\ln \left(\frac{2h-R}{R} \right)} \left(\frac{1}{h-y} + \frac{1}{h+y} \right) \tag{25}
\end{aligned}$$

El campo eléctrico que interesa para el efecto corona es en la superficie del conductor, por lo que se calcula $|\vec{E}|(y = h - R)$:

$$\begin{aligned}
|\vec{E}| &= \frac{U}{\ln \left(\frac{2h}{R} - 1 \right)} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2h-R} \right) \\
|\vec{E}| &= \frac{U}{\ln \left(\frac{2h}{R} - 1 \right)} \left(\frac{2h}{R(2h-R)} \right) \tag{26}
\end{aligned}$$

En función del diámetro del conductor:

$$|\vec{E}| = \frac{U}{\ln \left(\frac{4h}{\phi} - 1 \right)} \cdot \frac{8h}{\phi^2 \left(\frac{4h}{\phi} - 1 \right)} \tag{27}$$

Este valor del módulo del campo eléctrico es el que reviste importancia para los cálculos teóricos que serán utilizados posteriormente.

2.6 Modelación teórica de corriente de fuga por efecto corona

En una primera instancia se puede señalar que la conductancia por efecto corona es un parámetro constante y cuyo valor depende de las condiciones atmosféricas y ambientales. Esta conductancia aparece solo al superar cierto umbral de tensión y una vez que se inicia el fenómeno, el valor de aquella es independiente de la tensión aplicada. Además, el efecto corona es un fenómeno netamente conductivo por lo que no hay efecto capacitivos ni inductivos que modelar. Por otro lado, se supondrá que la descarga corona también ocurre en los 50 ciclos, despreciando los efectos que ocurren en frecuencias mayores.

La tensión aplicada es alterna de forma sinusoidal, por lo que el fenómeno ocurrirá tanto en el semiciclo positivo como en el semiciclo negativo, cuando la señal supere en módulo el umbral de tensión. Para modelar esto, se debe incluir en serie a la conductancia corona un diodo que permita la conducción de la corriente en ambos sentidos y con el mismo valor de inicio de operación.

Por otra parte, al operar una línea en vacío, se presentarán otras pérdidas por diferentes fenómenos de fuga. Esta conductancia está siempre presente y tendrá cierto valor que se puede asumir constante y, además, de mayor valor que la conductancia anterior, pues la descarga corona es más difícil que ocurra. Esta conductancia actúa en paralelo a la conductancia corona.

Las variables que se pueden medir son corriente de disipación y tensión aplicada, donde los instrumentos detectan valores efectivos.

Con esto, el circuito que modela lo ocurrido queda dado por la siguiente ilustración.

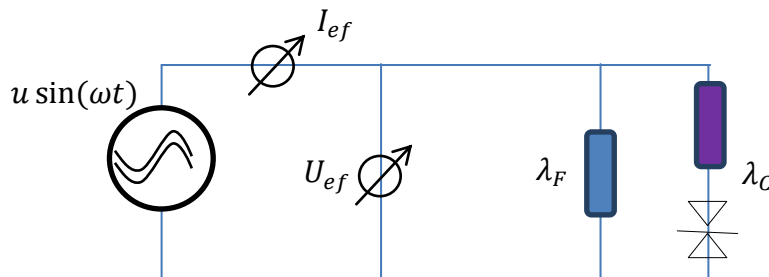


Ilustración 10: Circuito equivalente

Para poder modelar matemáticamente dicho circuito, el diodo se debe modelar como una función doble escalón, de tal forma que entregue un valor 0 cuando la señal está bajo el umbral y un valor 1 cuando la supere, es decir,

$$f_E = \begin{cases} 0 & u \sin(\omega t) < U_c \\ 1 & u \sin(\omega t) \geq U_c \end{cases}$$

Entonces la conductancia de disipación y la corriente instantánea quedan dadas por

$$\lambda_D = \lambda_F + f_E \cdot \lambda_C \quad (28)$$

$$i_D(t) = u \sin(\omega t) \cdot \lambda_D = u \sin(\omega t) \cdot (\lambda_F + f_E \cdot \lambda_C) \quad (29)$$

Al graficar el semiciclo positivo para la corriente para diversas tensiones aplicadas se obtiene el gráfico de la ilustración 11. En este caso se consideraron:

$$R_F = 100[M\Omega] \rightarrow \lambda_F = \frac{1}{R_F} = 10 [nS]$$

$$R_C = 200 [M\Omega] \rightarrow \lambda_C = \frac{1}{R_C} = 5 [nS]$$

$$U_C = 17,95 [kV]$$

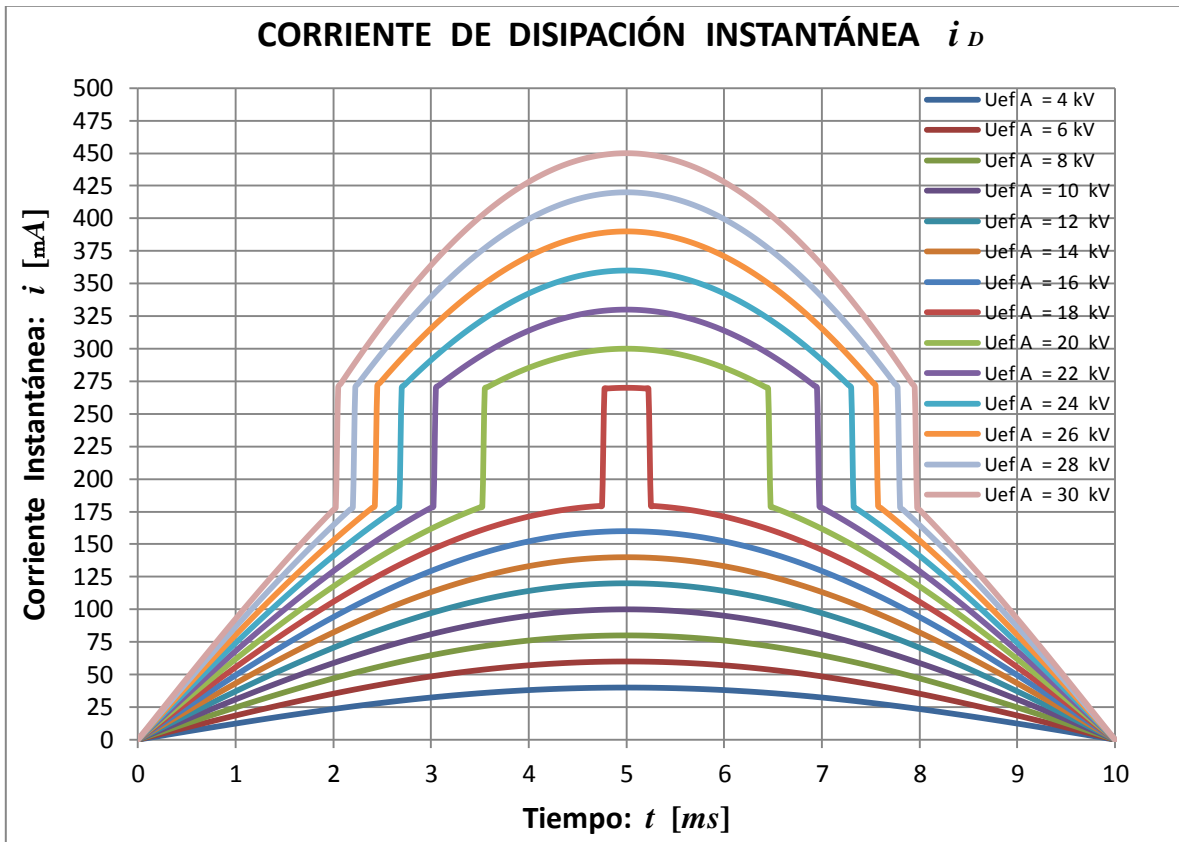


Ilustración 11: Corriente de disipación instantánea teórica

Para calcular la corriente efectiva se realizará el cálculo tradicional pero en versión discreta, es decir,

$$I_{efD} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum i^2(\omega t) \cdot \Delta t} \quad (30)$$

Con esto se obtiene el gráfico corriente efectiva de fuga versus tensión efectiva aplicada, dada por la curva $I_{ef D}$. En este gráfico también se incluyen las curvas que se obtendrían si no existiera efecto corona y si este existiera desde un principio, dadas por las curvas $I_{ef F}$ y $I_{ef T}$, respectivamente

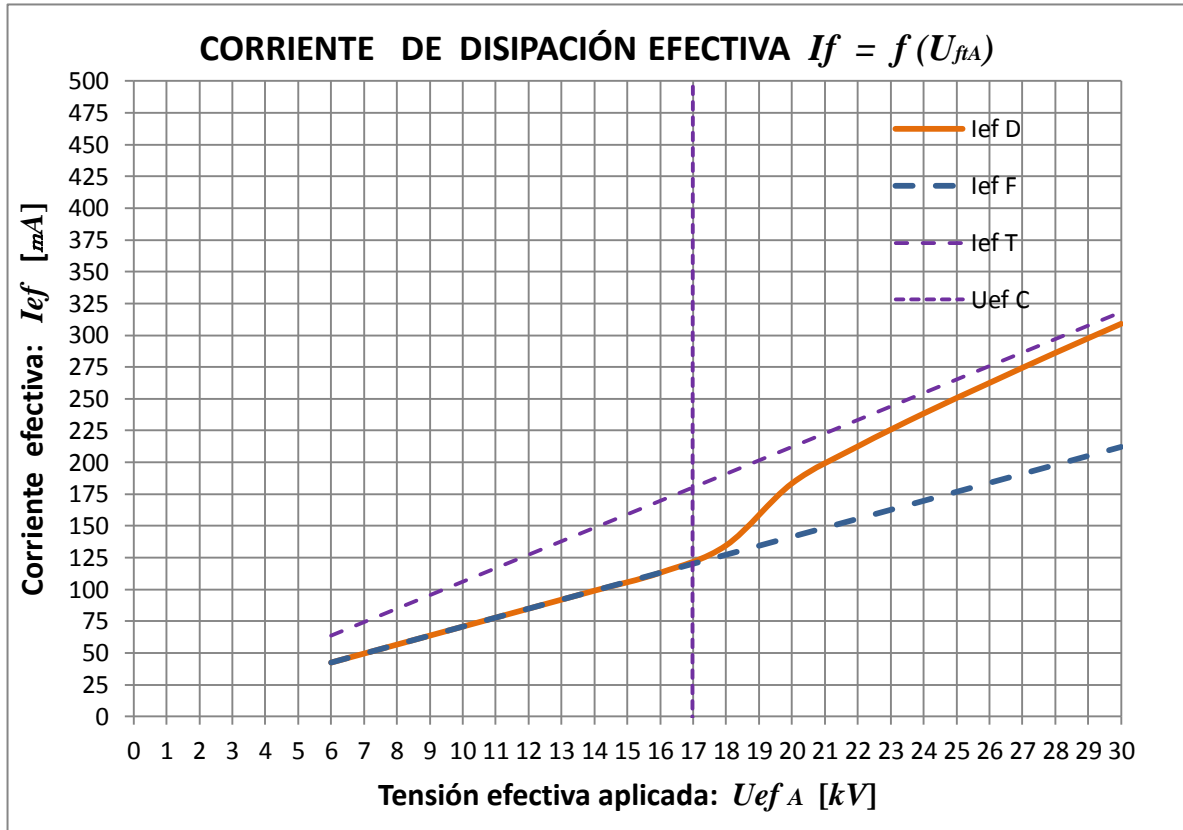


Ilustración 12: Corriente de fuga teórica versus tensión aplicada

Esta curva da una idea de los resultados que se obtendrán al realizar las mediciones experimentales en las diversas condiciones.

Capítulo 3

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO A ESCALA

En el presente capítulo se muestra la forma en que se llevará a cabo el trabajo experimental para estudiar el efecto corona a nivel de laboratorio.

Como se mostró en el capítulo anterior, en la ecuación (27), el campo eléctrico en torno a un conductor monopolar depende de la tensión a la cual está sometido y al diámetro de este, junto con la altura sobre la superficie. Esto es la base de la idea de poder simular el efecto corona en un modelo a escala, ya que al reducir el diámetro del cable y la altura con respecto a tierra se puede alcanzar la ruptura dieléctrica del aire, alimentando el cable con una tensión reducida.

Sin embargo, el efecto corona comienza mucho antes de que se produzcan los efectos audibles por el humano y la posibilidad de observar la descarga es aún más dificultoso. De hecho, la tecnología de fácil disponibilidad para detectar radiación ultravioleta es escasísima; por ejemplo, los fotodiodos operan a una longitud de onda mayor. Así, se debe idear también la forma de poder detectar el comienzo de la descarga corona.

Finalmente, se debe tener algún método simple para variar las condiciones atmosféricas y ambientales para poder lograr el propósito de esta memoria.

3.1 Maqueta y alimentación eléctrica

Para este trabajo se considerarán 5 tipos de conductores desnudos: cables 10 AWG, 12 AWG, 14 AWG y alambres 1,5 NYA y 2,5 NYA. A partir de los diámetros de éstos se calcula, según (27), la tensión necesaria para alcanzar la ruptura dieléctrica del aire para dos valores: $1,0 \left[\frac{kV}{mm} \right]$ y $3,0 \left[\frac{kV}{mm} \right]$ en función de la altura, la cual varía entre 0,1 [m] y 1,0 [m]. En estos cálculos se mantiene la aproximación de conductores macizos, es decir, en el caso de los cables se considera un conductor sólido de diámetro igual al que teóricamente tiene el cable.

Los resultados se muestran en la Tabla 3: Valores de tensión para alcanzar ruptura dieléctrica del aire.

Conductor	10 AWG		12 AWG		14 AWG		2,5 NYA		1,5 NYA	
Diámetro [mm]	2,58		2,05		1,62		2,5		1,5	
$ \vec{E} \left[\frac{kV}{mm} \right]$	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0	3,0
h [m]	$U_{m\acute{a}x}$ [kV]	$U_{m\acute{a}x}$ [kV]	$U_{m\acute{a}x}$ [kV]	$U_{m\acute{a}x}$ [kV]	$U_{m\acute{a}x}$ [kV]	$U_{m\acute{a}x}$ [kV]	$U_{m\acute{a}x}$ [kV]	$U_{m\acute{a}x}$ [kV]	$U_{m\acute{a}x}$ [kV]	$U_{m\acute{a}x}$ [kV]
0,1	6,46	19,37	5,37	16,12	4,44	13,32	6,30	18,89	4,17	12,51
0,2	7,37	22,12	6,10	18,29	5,01	15,04	7,18	21,55	4,70	14,10
0,3	7,90	23,71	6,52	19,56	5,34	16,03	7,70	23,10	5,01	15,02
0,4	8,28	24,84	6,82	20,45	5,58	16,74	8,06	24,19	5,22	15,67
0,5	8,57	25,71	7,05	21,14	5,76	17,28	8,34	25,03	5,39	16,18
0,6	8,81	26,42	7,23	21,70	5,91	17,73	8,57	25,72	5,53	16,59
0,7	9,01	27,02	7,39	22,18	6,03	18,10	8,77	26,30	5,65	16,94
0,8	9,18	27,54	7,53	22,59	6,14	18,43	8,94	26,81	5,75	17,24
0,9	9,33	28,00	7,65	22,96	6,24	18,72	9,08	27,25	5,83	17,50
1,0	9,47	28,41	7,76	23,28	6,32	18,97	9,22	27,65	5,91	17,74

Tabla 3: Valores de tensión para alcanzar ruptura dieléctrica del aire

Se puede apreciar que la tensión requerida depende principalmente del valor de la ruptura dieléctrica del aire y del tipo de cable, quedando en un segundo plano el valor de la altura. Esto último resulta bastante beneficioso dado que se desea construir una maqueta transportable donde la altura quede como un parámetro fijo.

Por otro lado, la tensión máxima necesaria para que comience el fenómeno es de 28,41 [kV] cuando la altura del cable 10 AWG es 1,0 [m] y el campo eléctrico que se desea entorno al conductor es $3,0 \left[\frac{kV}{mm} \right]$. Con esto se rescata que para desarrollar el laboratorio se necesita un transformador que eleve la tensión alterna domiciliaria a valores superiores a 30 [kV]. Además, dado que se necesita solo tensión y no potencia, el tamaño del transformador se reduce considerablemente.

A partir de estos resultados se decide crear una caja acrílica de 1,2 [m] de largo, 0,4 [m] de ancho y 0,4 [m] de alto. En su parte inferior se dispondrá de una plancha metálica de 0,86 [m] de largo por 0,38 [m] de ancho que servirá para simular el efecto tierra, para lo cual será conectada a tierra a través de un cable 12 AWG aislado y fijado con un perno a la plancha. Los conductores se ubicarán a una altura de 0,2 [m] sobre esta última.

Mantener una buena tensión mecánica en el conductor es importante para lograr una altura con respecto a tierra constante y evitar una disminución del radio de curvatura, que como se señaló, también afecta al inicio de la descarga. Por este motivo, en cada extremo de la caja y al medio de ésta, se colocan dos trozos triangulares de acrílico de base 0,15 [m] y 0,3 [m] de alto que servirán de soporte a los conductores y cuya forma se debe a que tienen que soportar el torque que genera tensión mecánica a la cual serán sometidos los cables y alambres, lo cual se logra con la amplia

base que los triángulos tienen. Los triángulos tendrán una separación de $0,01[m]$ desde la caja para poder enganchar los cables.

Al costado de uno de estos triángulos se efectuará una perforación de forma de poder introducir el cable de alimentación que también será un cable aislado 12 AWG, mientras que la perforación para el cable de tierra se encontrará al medio de la de las caras de la caja.

La elección de acrílico como material responde a sus propiedades como aislante, presentando una rigidez dieléctrica de $30 \left[\frac{kV}{mm} \right]$. Al tener un espesor de $4 [mm]$ se necesita una tensión mínima de $120 [kV]$ para que pierda sus propiedades aislantes y, dada las tensiones con las cuales se trabajará, se tendrá una buena aislación que otorga seguridad en la operación.

A continuación se muestra un esquema de la maqueta que se utilizará, indicando las diversas dimensiones.

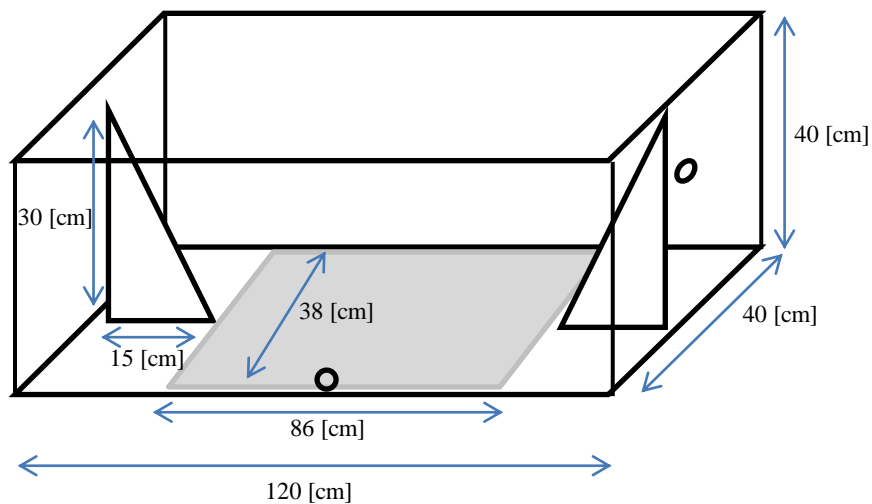


Ilustración 13: Maqueta a diseñar

Los cables que se colocarán serán desnudos por lo que se les debe quitar la aislación que poseen. Tendrán $0,7 [m]$ de largo aproximadamente y en sus extremos serán doblados para dejar un orificio donde se pueda colocar uno de los extremos de un tensor. Además, se diseñarán dos elipses metálicas que serán las que se coloquen en los triángulos y que quedarán unidas al otro extremo del tensor señalado. En una de ellas se realizará la conexión eléctrica con el cable de alimentación. Con este diseño se busca lograr la tensión mecánica requerida para que el conductor quede horizontal, por los motivos ya señalados, y la facilidad necesaria para cambiar los diversos conductores.

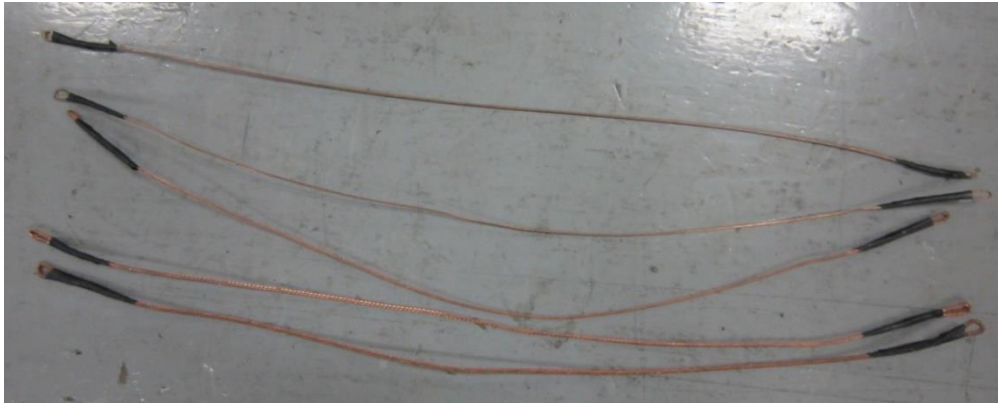


Ilustración 14: Conductores a utilizar



Ilustración 15: Elipses y tensores a utilizar

Para evitar el efecto punta, que facilitaría considerablemente el efecto corona, se forrará con papel aluminio, con el fin de unificar el campo eléctrico, los extremos de los conductores y la unión del cable de alimentación, siendo cubierto posteriormente con huincha aisladora y así forzar que el fenómeno ocurra a lo largo del conductor.



Ilustración 16: Extremos de los conductores a utilizar

La alimentación se generará con un HIPOT de corriente alterna marca Seba Dynatronic, modelo HTR 55-1, el cual consiste en un transformador variable de 220/55.000 [V] y que a través de su control se puede regular la razón de transformación y medir tensión y corriente en el secundario. Además posee la conexión para instalar un amperímetro en serie y así medir de mejor forma dicha corriente. El control señalado posee la conexión para la tensión domiciliar y debe ser conectado a tierra al igual que el transformador.

Los valores de placa del transformador son:

Tensión nominal	230 / 50.000 [V]
Corriente nominal AT	0,03 [A]
Corriente nominal BT	6,52 [A]
Potencia nominal	1500 [VA]
Frecuencia	50 [Hz]
Tipo de enfriamiento	Autoenfriamiento
Tipo de aislación	E (hasta 120 °C)
Tensión de prueba	60 [kV]

Tabla 4: Valores placa del transformador de alta tensión

La salida de la alimentación del transformador se realiza a través de una pértiga en la cual se coloca, en su extremo superior, una cubierta de goma con la finalidad de disminuir la posibilidad de efecto corona en la toma energizada.

El equipo se muestra en las ilustraciones 17 y 18.



Ilustración 17: Transformador a utilizar



Ilustración 18: Control del equipo a utilizar

3.2 Detección del efecto corona

Para poder detectar el efecto corona se diseña una simple antena que consiste en un conductor de cobre de 16 [cm] de largo dentro de una caja aislante de 15 [cm], 5,5 [cm] de ancho y 5,5 [cm] de alto y en la cual se coloca papel aluminio, de forma de obtener una antena parabólica con simetría cilíndrica que apunta al conductor.

Tomando como ejes las diagonales de la caja, la antena tendrá la forma $y = ax^2 - c$, es decir, es una parábola que no tiene desplazamiento lateral con respecto al eje vertical. Por otro lado, para que calce de buena forma en la caja se desea que $y = 0$ cuando $x = c$, de aquí se obtiene:

$$0 = ac^2 - c$$

$$a = \frac{1}{c}$$

Luego, las dimensiones elegidas son $c = 25$ [mm] y $a = 0,04$ [mm⁻¹].

El dibujo de un corte transversal de la antena se muestra en la ilustración 19.

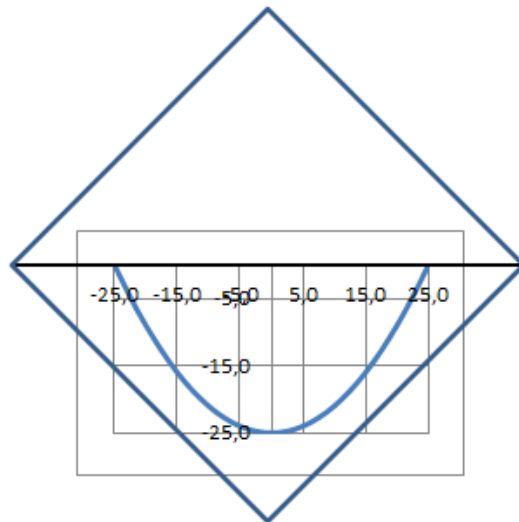


Ilustración 19: Corte transversal de la antena

Esta antena se conecta a la punta de un osciloscopio levantado de tierra y cuya otra punta es conectada a la misma tierra del transformador. Esto permite medir la tensión inducida en la antena, analizando su forma de onda, la cual se ve afectada por ruido cuando el fenómeno comienza a presentarse.

La antena diseñada se muestra en la ilustración 20.

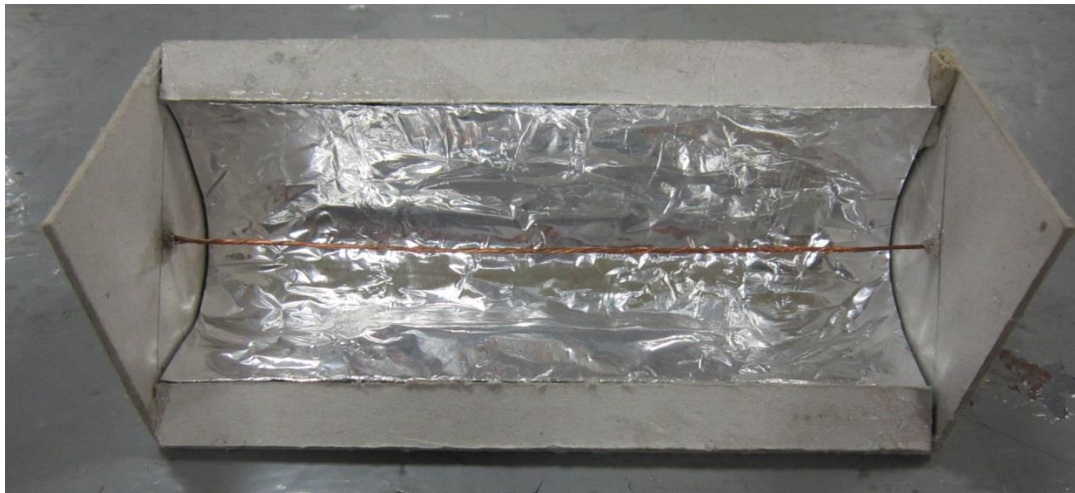


Ilustración 20: Antena a utilizar

3.3 Modificación de variables atmosféricas y ambientales

Dado que se desea modificar las condiciones atmosféricas y ambientales, la caja acrílica cuenta con una tapa del mismo material para poder aislar la atmósfera interior.

En el extremo inferior izquierdo de la cara frontal de la maqueta se realiza una perforación en la cual se colocará una manguera, cuyo otro extremo se conectará a una tetera que permitirá inyectar vapor de agua a la caja. Con esto se logra aumentar la temperatura y la humedad del aire.

También se rociará el conductor con agua para simular el efecto de la lluvia y de la presencia de gotas en el conductor. Las otras alteraciones consistirán en aplicar agua con sal para simular una atmósfera costera, secar el aire y aumentar su temperatura con un termo-ventilador eléctrico y quemar papel en el interior de la caja acrílica para llenar la atmósfera con humo.

Para medir las variables atmosféricas se colocará en el interior de la caja una estación meteorológica análoga que mide presión, temperatura y humedad relativa. Sus características se muestran en la tabla 5 y en la ilustración 21 el artefacto a utilizar.

Diámetro	110 [mm]
Presión	970 – 1150 [hPa]
Temperatura	-20 – 50 [°C]
Humedad relativa	0 – 100 %

Tabla 5: Características estación meteorológica



Ilustración 21: Estación meteorológica a utilizar

3.4 Operación y medidas de seguridad

El desarrollo de este laboratorio se realizará en el Laboratorio de conversión de la energía del Departamento de Ingeniería Eléctrica perteneciente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Aquí concurren constantemente funcionarios, profesores y estudiantes y, dado que se trabajará con tensiones que alcanzarán los 40 [kV], se deben tomar todas las medidas necesarias para evitar cualquier accidente que podría ser fatal.

El lugar donde se haya emplazada la maqueta será señalado y encerrado con una huincha de peligro. Dentro de dicha zona, de 7 por 4 metros de extensión, se encontrarán todas las conexiones eléctricas, es decir, la caja acrílica con el conductor, el transformador y la conexión a tierra.

A dicha conexión a tierra se encontrará conectada también una pértiga de descarga con la cual se tocará el conductor antes de manipularlo. Aunque debiese quedar con tensión nula una vez que el transformador se apaga, ya que para apagarlo se debe llevar la manilla que regula la razón de transformación al mínimo, el contacto con la pértiga asegura que su tensión sea efectivamente nula.



Ilustración 22: Pértiga de descarga

Los otros elementos de protección del equipo son la protección por sobrecorriente que cuenta el instrumento control y una resistencia de 88,6 [k Ω] que se conecta a la salida del transformador, dentro de la pértiga de alimentación, y que sirve para alejar la conexión de las otras partes metálicas del instrumento y que deja de operar en caso de sobrecorriente. En su extremo superior, la cubierta de goma sirve para evitar el contacto con el punto energizado en donde se conecta el cable de alimentación que se dirige a la caja acrílica.

Además, se cuentan con las protecciones termomagnética, que opera por corriente y temperatura, y diferencial propias de la instalación eléctrica del laboratorio.

En la siguiente imagen se muestra la ubicación de los diversos equipos y su disposición para realizar las mediciones.



Ilustración 23: Disposición de los equipos en lugar de trabajo

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Detección del efecto corona

En la ilustración 24 se muestran las capturas de las señales detectadas por el osciloscopio. En la primera no hay efecto corona aun mientras que en la segunda ya está presente, destacándose por la interferencia de frecuencia bastante superior a los 50 ciclos de la fundamental. En este caso, el efecto corona ya es de una intensidad considerable, mientras que cuando este comienza las alteraciones de la señal son mucho menores y de mayor dificultad para rescatar en una captura de pantalla del osciloscopio por la fugacidad de las descargas.

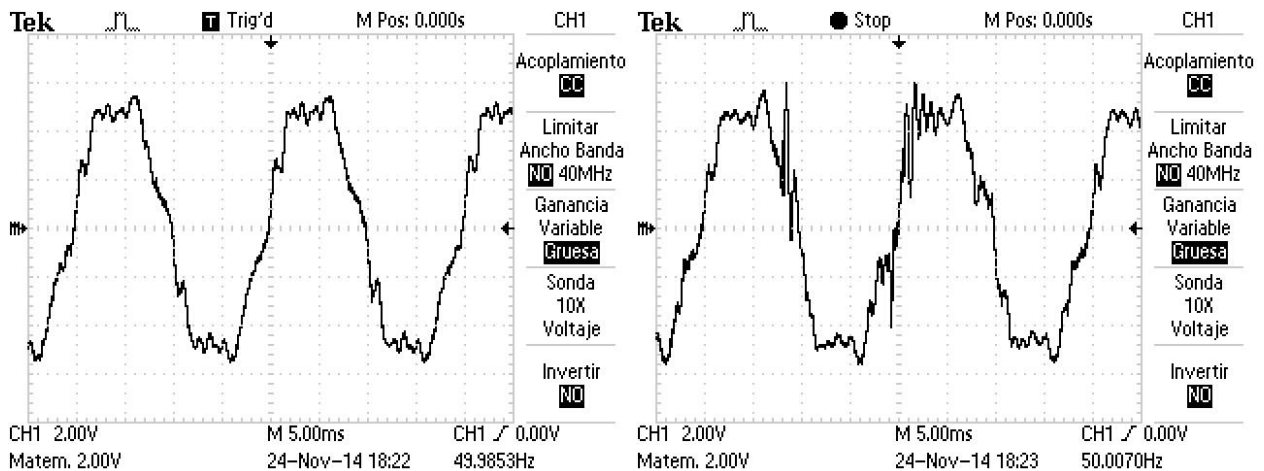


Ilustración 24: Señal detectada sin efecto corona (izquierda) y con efecto corona (derecha)

Como se puede apreciar, la antena cumple con su misión de detectar el fenómeno corona, lo cual ayuda considerablemente a identificar el inicio de la descarga. La desventaja presentada es la gran presencia de armónicos en la señal, lo que se puede apreciar en la forma de onda de esta, que dificultan en cierto modo la detección las descargas a través de las alteraciones de la sinusoidal.

4.2 Resultados de las mediciones experimentales

Con la implementación detallada en el capítulo anterior se pudo medir la corriente efectiva de fuga en función de la tensión efectiva aplicada para las 6 situaciones atmosféricas distintas señaladas, entre los 5 [kV] y los 40 [kV], exceptuando en el caso de atmósfera con vapor, donde se alcanzó un máximo de 20 [kV], ya que posteriormente se presentaban efectos de conducción eléctrica a través del líquido condensado en los soportes de acrílico donde se apoyan los conductores, lo cual alteraba las mediciones.

En el caso de la atmósfera salina también se presentaron dificultades para completar las mediciones ya que se produjeron descargas entre el conductor y la placa de tierra, que por cuyo color rojizo se puede argumentar por la conducción de los iones que se producen al diluir la sal común en el agua, de esta forma para el conductor 14 AWG las mediciones llegaron a los 37 [kV] y en el conductor 12 AWG, hasta los 39 [kV]

En la tabla 4 se muestran las condiciones atmosféricas logradas, detallando su temperatura y su humedad relativa. Las mediciones se lograron con una presión atmosférica de 101.700 [Pa].

Condición atmosférica/ambiental	Temperatura [°C]	Humedad relativa [%]
Normal	25	60
Rociado	23	85
Rociado con sal	23	85
Vapor	30	98
Caliente	40	20
Humo	30	30

Tabla 6: Temperatura y humedad de las condiciones atmosféricas logradas

Con estos valores adquiridos, se pudo realizar los gráficos de corriente de fuga versus tensión aplicada para cada conductor en las diversas situaciones y, a través del software Matlab, realizar una regresión por mínimos cuadrados y así poder ajustar las curvas.

A partir de esos ajustes, se define una conductancia dinámica como:

$$\lambda = \frac{dI}{dU}$$

Según lo explicado en 2.6 *Modelación teórica de corriente de fuga por efecto corona*, la conductancia de disipación se constituye por una conductancia de fuga y una conductancia corona. Dado que interesa solo el segundo término, se tiene:

$$\lambda_c = \lambda_D - \lambda_f$$

Como la corriente de disipación es una función por partes, una primera parte lineal y una segunda cuadrática, se identifica el punto de comienzo del fenómeno corona y se realiza una

regresión lineal para los valores bajo él y para los valores sobre él, una regresión de segundo orden.

Es decir, si el ajuste realizado es de la forma:

$$I_D = a \cdot U^2 + b \cdot U + c$$

$$I_f = d \cdot U + e$$

Las diversas conductancias son:

$$\lambda_D = 2 \cdot a \cdot U + b$$

$$\lambda_f = d$$

$$\lambda_C = 2 \cdot a \cdot U + b - d$$

Este es el procedimiento que se realizará para cada condición lograda en los cinco tipos de conductores con que se trabajó.

Notar que la tensión aplicada es del orden de los kilovoltios y la corriente de disipación es del orden de los microamperios, por lo que la conductancia está en el orden de los nanosiemens.

4.2.1 Condición normal

En primer lugar se muestran los resultados de las mediciones para la condición normal. Con una cruz se indican los valores de las mediciones, la curva roja es la curva de ajuste para la corriente de fuga, la cual se grafica hasta los 40 [kV] para mostrar cómo sería la curva si no se presentara el efecto corona y la curva negra es la curva de ajuste desde que comienza el fenómeno corona. Se indica en cada gráfico, a través de una línea vertical, el valor de la tensión con la cual comienza a manifestarse el fenómeno, lo cual fue detectado con la antena diseñada y que coincide con el aumento de la corriente de fuga.

En la leyenda se colocan los valores de la conductividad de fuga y la conductividad de disipación para los dos casos señalados, es decir, sin efecto corona y con efecto corona. Se indica también el valor del coeficiente de determinación R^2 para cada curva, donde el color de las letras indica a qué curva se refiere. Un valor cercano a la unidad de dicho coeficiente indica un buen ajuste de la curva con respecto a las mediciones.

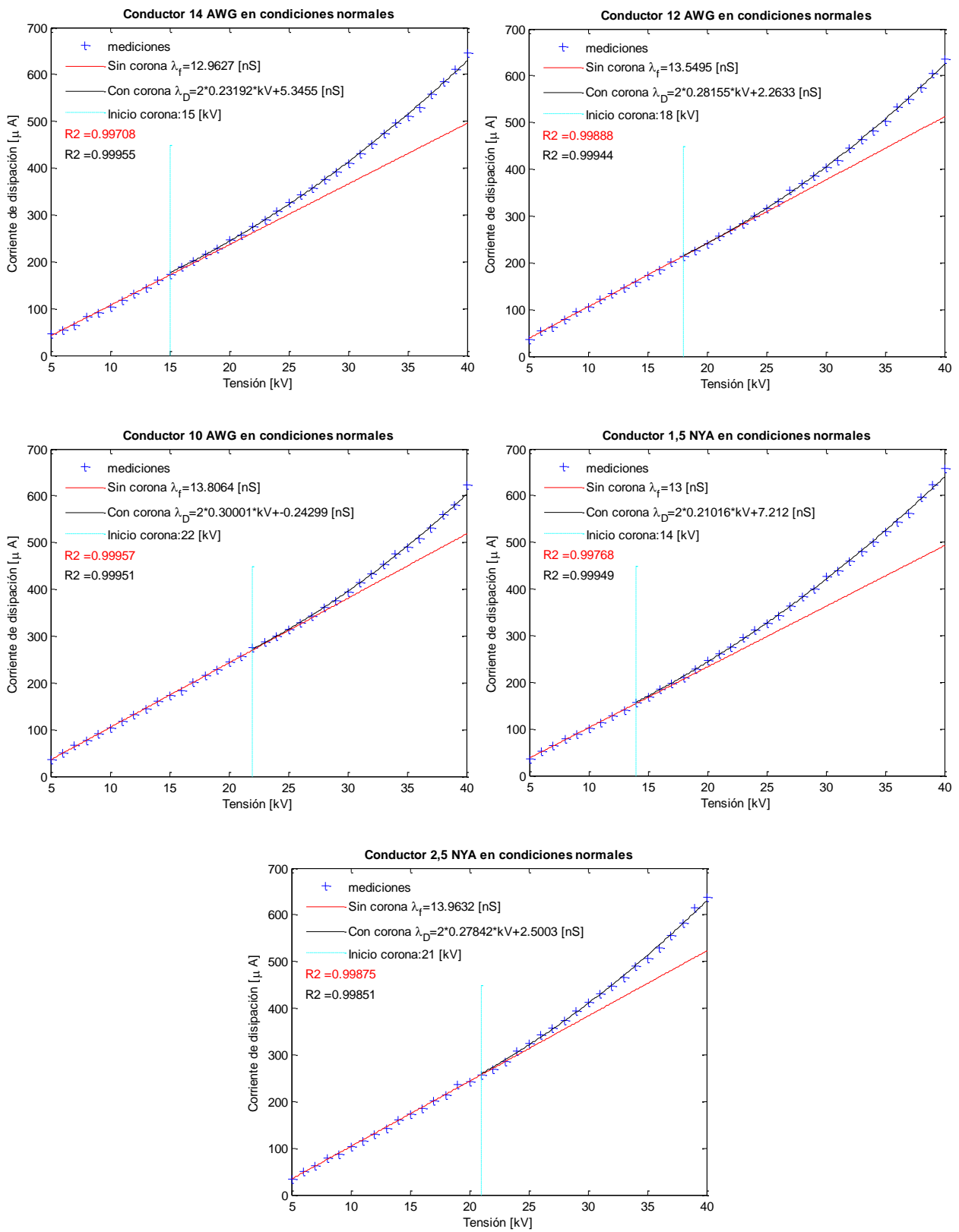


Ilustración 25: Resultados en condiciones normales

Como primer resultado, se puede apreciar claramente que los cálculos teóricos para el diseño de la maqueta, donde se calculó la tensión necesaria para alcanzar la ruptura dieléctrica del aire circundante del conductor, coinciden plenamente con los valores de inicio del efecto corona en los 5 tipos de conductores. De esta forma, se pudo recrear el fenómeno en la condición ideal, donde el coeficiente m , que depende del estado del conductor, toma el valor 1, es decir, el efecto corona comienza cuando ocurre la ruptura dieléctrica del aire, a los $2,9 \left[\frac{kV}{mm} \right]$ aproximadamente.

En este caso, se pudo trabajar en condiciones atmosféricas muy próximas a las normales, donde la diferencia radicó en los $400 [Pa]$ de presión atmosférica. De todas formas, el valor de la densidad relativa es de $1,006$ y con esto, no se ve afectado el valor del gradiente superficial donde comienza la descarga corona.

Por otro lado, el valor del gradiente superficial de Peek queda fuera de rango por trabajarse con conductores de pequeño calibre. Dicha fórmula es aplicable para conductores de tamaños propios de la transmisión eléctrica. Así, el factor $\left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta R}} \right)$ no debe considerarse en este modelo a escala. Además, este factor hace referencia al campo eléctrico para visualizar el fenómeno, pero las descargas parciales, imperceptibles para el ojo humano, ya están presentes desde que se alcanza el valor de g_0 .

El segundo punto a rescatar es el buen ajuste que tiene la dependencia cuadrática de la corriente de disipación cuando aparece el efecto corona, determinado por un valor muy cercano a 1 del factor R^2 . Si se compara con la modelación teórica establecida en el capítulo 2, se puede apreciar que la curva es bastante similar a la primera parte de aquella, cuando el efecto corona comienza a manifestarse, y la curva mantiene su convexidad, sin alcanzar aun la saturación de la descarga corona. Por las tensiones con que se trabaja, no es posible alcanzar esto último por lo que no se puede determinar la conductancia corona del circuito equivalente mostrado como un valor fijo. De todas formas, queda claro que el circuito equivalente establecido es correcto en su forma, siendo la única diferencia que el valor de la conductancia corona no tiene un valor constante, sino que depende de la tensión aplicada.

En esta situación y para todos los conductores, predomina la corriente de fuga en vez de la corriente por efecto corona, pues la corriente de disipación (curva negra) no se separa demasiado de la curva que se presentaría sin el fenómeno corona (curva roja).

Estas curvas serán la base para realizar las comparaciones con las alteraciones realizadas en el ambiente al interior de la caja acrílica. En los siguientes gráficos, las curvas ajustadas en la situación normal serán graficadas junto con las nuevas curvas obtenidas para apreciar de mejor forma la diferencia que ocurre al alterar las condiciones del aire circundante al conductor.

4.2.2 Conductor rociado con agua

Como ya se señaló, el conductor fue rociado con agua potable para intentar simular el efecto que tendría el depósito de gotas sobre el conductor. Los resultados son los mostrados en la ilustración 26.

En este caso, el inicio de la descarga corona disminuyó en todos los conductores. En el caso del alambre 1,5 NYA la disminución fue de solo 1 [kV], mientras que en el caso del 2,5 NYA disminuyó 5 [kV]. Con eso se prueba la sensibilidad que tiene el fenómeno a la humedad y a la presencia de gotas en el conductor. El conductor de mayor calibre tiene mayor opción de contener gotas en él, por lo que tiene sentido que justamente aquel fuese el que mayor disminución presentara en la tensión necesaria para que ocurriera el fenómeno. En el caso de los cables, la disminución fue similar para los tres casos, fluctuando entre 2 y 3 [kV] menos.

Con esto, se puede apreciar que el parámetro m no alcanza los valores señalados en el marco teórico. Esto se puede argumentar ya que la teoría está desarrollada para conductores muchos más gruesos que pueden contener mayor número de gotas y, por ende, una mayor cantidad de discontinuidades en el campo eléctrico que en los conductores utilizados en este trabajo. En esta situación fluctuó, el valor de m entre 0,75 y 0,9, o sea, el campo eléctrico de inicio de la descarga varió entre $2,22 \left[\frac{kV}{mm} \right]$ y $2,73 \left[\frac{kV}{mm} \right]$.

La corriente de fuga aumento con respecto al caso normal pero la conductividad de fuga se mantuvo constante, con valores muy cercanos a los anteriores, obteniéndose así curvas prácticamente paralelas. La curva de ajuste de segundo orden tiene un comportamiento similar también, sin embargo, el caso normal alcanza una mayor pendiente y su curva de ajuste comienza a acercarse a la curva ajustada en este caso. Así, la conductividad es mayor solo al inicio del fenómeno corona mientras que a tensiones cercanas a los 35 [kV] la conductividad en el caso normal es levemente superior. Lo anterior se puede justificar debido a que el movimiento de carga es más difícil en un líquido que en un gas. En este caso, parte del conductor presenta gotas de agua y en ella es más difícil la conducción eléctrica.

Por otro lado, las nuevas curvas ajustadas presentan un mayor componente constante y un menor componente variable, lo que se puede apreciar en la poca convexidad de la curva cuadrática obtenida.

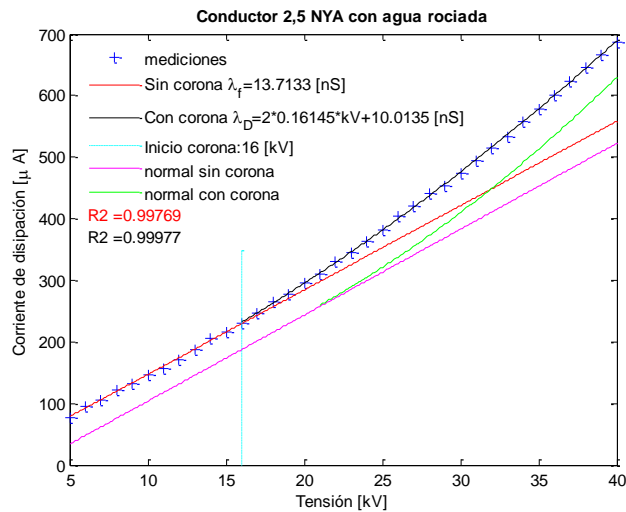
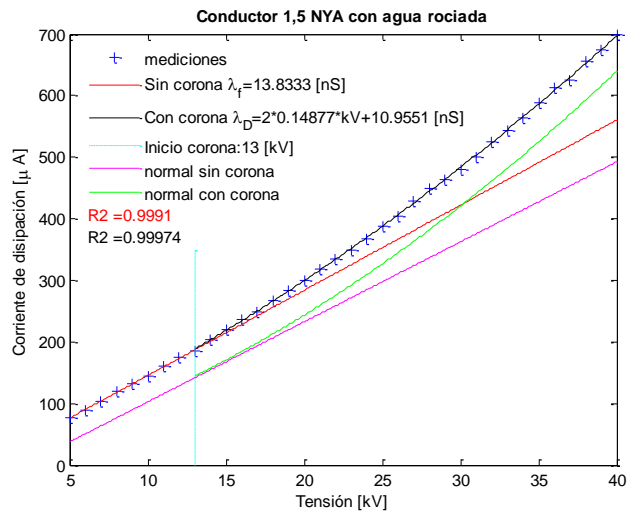
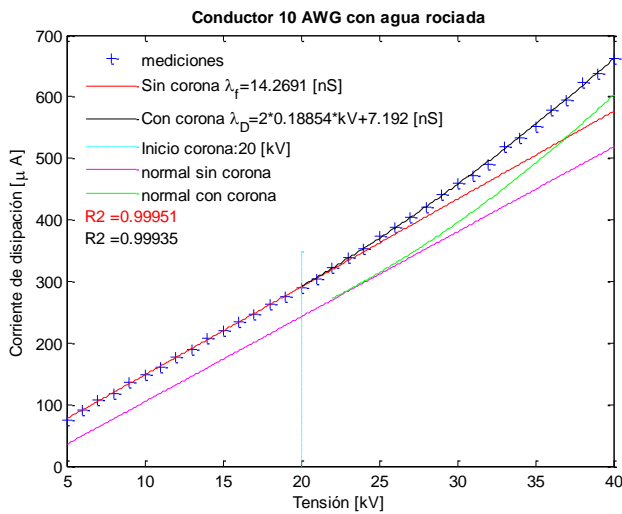
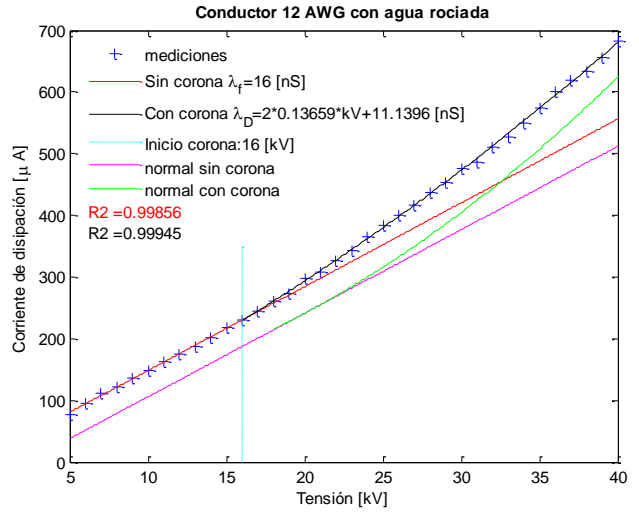
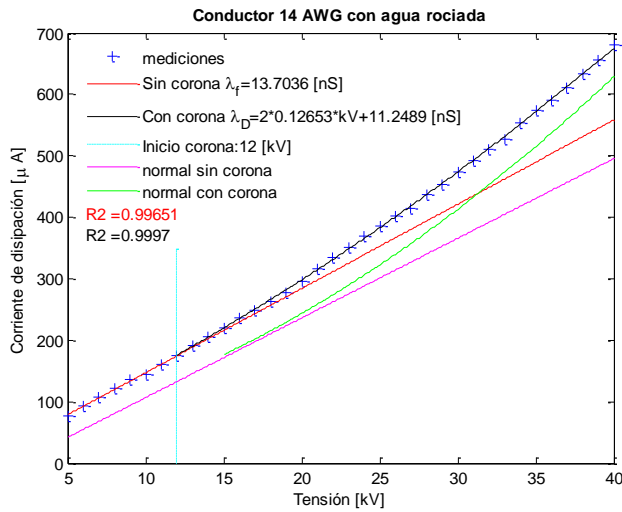


Ilustración 26: Resultados con conductor rociado con agua

4.2.3 Conductor rociado con agua y sal depositada

Luego, tanto en el conductor como en la placa de tierra se colocó sal común, o sea, cloruro de sodio, y se procedió a repetir la aspersión de agua. Los resultados se muestran en la ilustración 28.

Tal como era de esperarse, el fenómeno comienza a tensiones menores que los dos casos ya estudiados, lo cual ocurre por la disociación del compuesto iónico en el agua y la consecuente formación de iones positivos y negativos. Así, hay mayor carga que se moverá ante la presencia del campo eléctrico.

El valor de m se encuentra entre 0,66 y 0,85. Nuevamente, la menor variación la sufrió el alambre más delgado, disminuyendo en 2 [kV] el inicio del fenómeno, y la mayor variación, el alambre y el cable más grueso, donde el inicio del efecto disminuyó hasta 7 [kV]. Tal como en el caso anterior, esto ocurre por la mayor capacidad de depositarse de sal y agua en estos últimos conductores. El campo eléctrico con el cual se hace presente el fenómeno corona varía entre $1,95 \left[\frac{kV}{mm} \right]$ y $2,55 \left[\frac{kV}{mm} \right]$.

Pero al igual que el caso anterior, los iones tienen mayor masa que los electrones por lo que su movilidad es menor y, entonces, la conductividad por efecto corona es menor que en el caso normal, observándose en los valores cúlmenes de tensión logrados, donde la curva de ajuste para la situación normal se acerca a la curva de ajuste de este caso. La conductancia de fuga se mantiene prácticamente constante con respecto al caso normal y la conductancia de disipación tiene una mayor componente constante y una componente variable entre dos a tres veces menor.

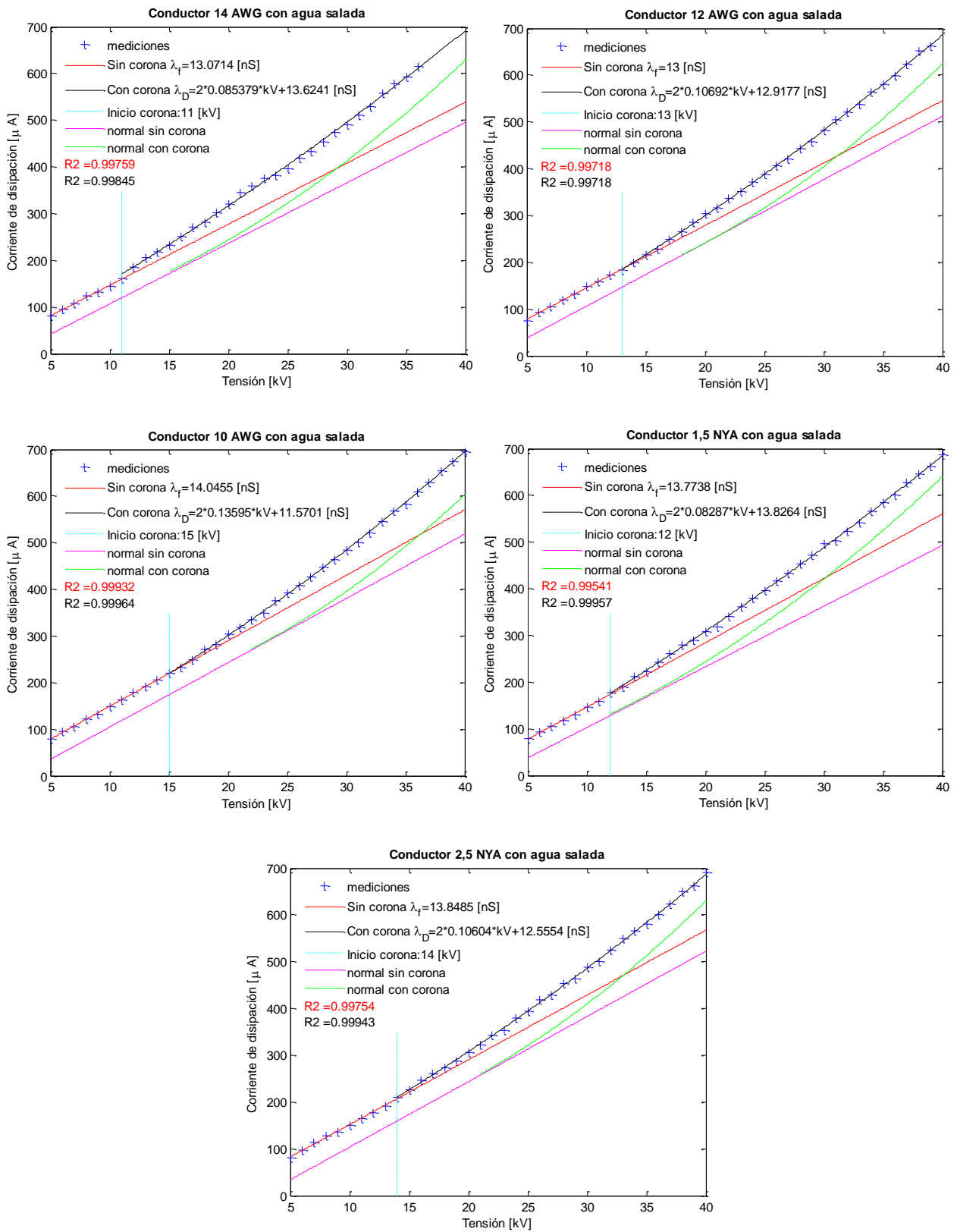


Ilustración 27: Resultados con conductor rociado con agua rociada y sal

4.2.4 Conductor con vapor de agua

Esta condición fue, por lejos, la que presentó mayor dificultad para medir, ya que la corriente de disipación aumentó bruscamente una vez que se inyectó vapor de agua a la caja acrílica, alcanzándose valores cercanos a la corriente nominal del enrollado de alta tensión cuando se alimentó con 5 [kV], equivalentes a la mínima tensión que entrega el transformador. Con esto, además de la dificultad de medir, fue una situación incluso peligrosa para el equipo.

Para poder obtener las mediciones se redujo la tensión máxima de alimentación a 20 [kV] y se debió esperar que disminuyera la concentración de vapor a través de la condensación de éste, principalmente en las caras de la caja. El siguiente problema que surgió fue la disminución de la corriente de disipación en el tiempo justamente por dicho efecto, lo cual llevó la obtención de curvas poco suaves, sobre todo en los conductores más gruesos y curvas de ajuste con menor precisión que los casos anteriores.

Los resultados se muestran en la ilustración 29, donde se aprecia la fuerte disminución de la tensión necesaria para la presencia del fenómeno. Así, el parámetro m alcanza incluso el valor 0,5 para el caso del cable 10 AWG mientras que en los otros conductores se alcanzan valores de hasta 0,66. Con esto, el campo eléctrico de inicio se encuentra entre $1,49 \left[\frac{kV}{mm} \right]$ y $1,99 \left[\frac{kV}{mm} \right]$.

La conductancia de fuga también presenta un aumento y toma valores entre los 17 [nS] y 21 [nS]. La conductancia de disipación aumenta considerablemente también y se presentan dos casos. El primero es el que le ocurre a los dos conductores más gruesos, donde se tiene una importante componente constante y una componente variable bastante pequeña, obteniéndose una curva de ajuste prácticamente recta. Para los conductores de menor calibre, el coeficiente que acompaña a los kilovoltios en la conductividad es de mayor valor que todos los casos anteriores y el coeficiente constante es de valor negativo, con lo que se obtiene una curva de ajuste que crece fuertemente.

En los tres casos ya presentados la corriente de disipación que se alcanzó a los 40 [kV] se encontraba entre los 600 [μ A] y 700 [μ A], mientras que en esta situación se alcanzaban los 600 [μ A] con la mitad de la tensión y, dada las altas conductividades determinadas y extrapolando, la corriente llegaría entre 1,1 [mA] y 1,4 [mA] con 30 [kV].

Así, es fácil ver que el vapor de agua es una situación mucho más propicia tanto para el inicio como para la intensidad del efecto corona en los conductores que el líquido condensado o una solución iónica, puesto que la movilidad es mucho mayor en los gases. Además, si se considera el hecho que aumentó la temperatura ambiente, la energía cinética de las partículas es mayor, lo que beneficia también al fenómeno corona.

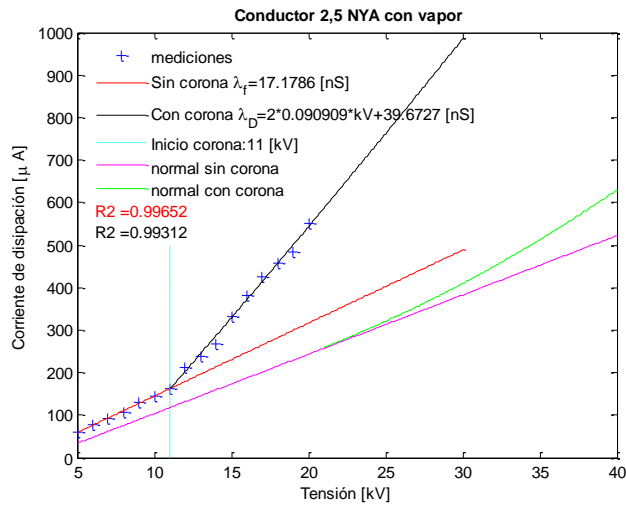
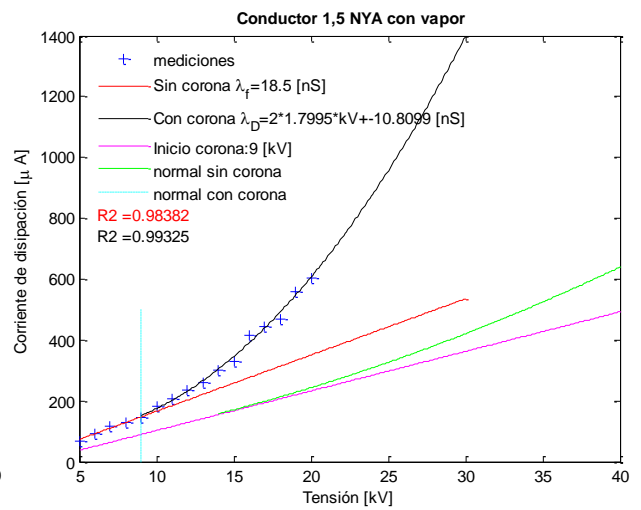
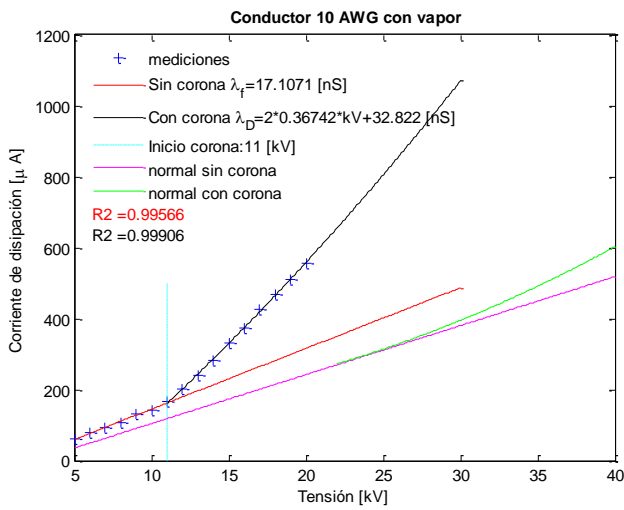
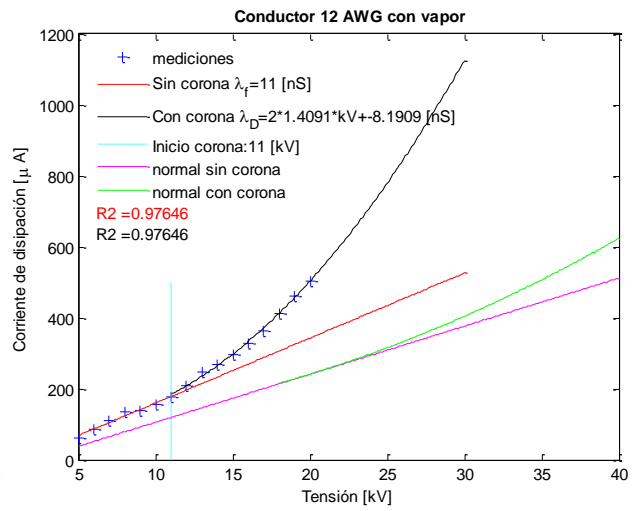
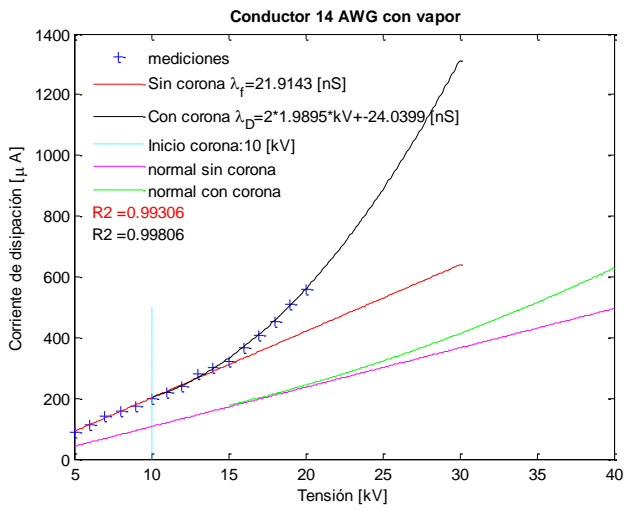


Ilustración 28: Resultados con conductor sometido a vapor

4.2.5 Conductor en ambiente cálido

En este y en el siguiente caso la situación atmosférica cambia considerablemente pues se generan ambientes cálidos y con pequeña humedad.

Ante el aumento de la temperatura y la disminución de la humedad, el inicio del fenómeno corona puede aumentar incluso en 5 [kV], tal es el caso del cable 14 AWG, siendo la excepción el alambre 2,5 NYA donde se observó una disminución del inicio del fenómeno en 1 [kV], que implica un campo eléctrico de $2,78 \left[\frac{kV}{mm} \right]$.

El aumento del gradiente superficial necesario para que se produzca el efecto corona no se puede justificar por el cambio en la densidad relativa del aire, ya que este parámetro toma el valor 0,95 cuando se alcanzan los 40 [°C]. Matemáticamente, no queda más que señalar que el factor de corrección toma valores mayores que la unidad, alcanzando el valor 1,33 para el cable más delgado, por lo que el campo eléctrico toma un valor de $3,99 \left[\frac{kV}{mm} \right]$.

La conductividad de fuga toma valores muy similares al caso normal y la conductividad de disipación presenta una componente variable bastante pequeña lo que hace que la parábola obtenida se separe lentamente de la recta obtenida por la conductividad anterior. Esta conductividad dinámica es menor que el caso normal, por lo que la curva de este caso prácticamente alcanza a la nueva curva obtenida, igualando la corriente de disipación a los 40 [kV].

Esto ratifica los resultados del caso del conductor con vapor: en el caso de un conductor en buen estado, la humedad es el factor más importante para el inicio y la intensidad del fenómeno corona. Aunque el aumento de temperatura, según la teoría, beneficiaría el efecto corona su relevancia es mucho menor que la humedad ambiental.

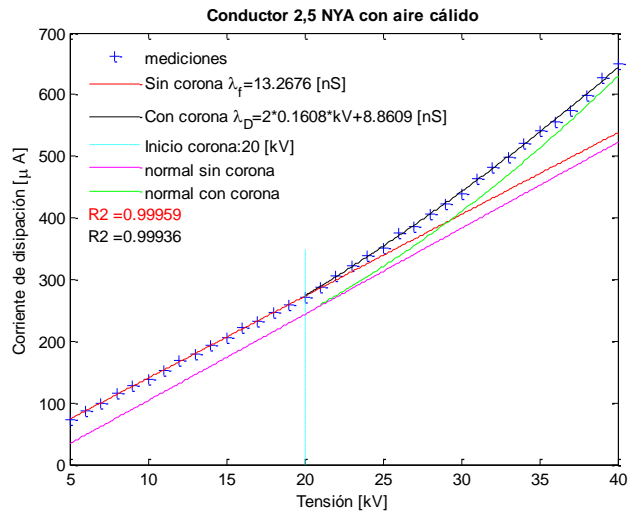
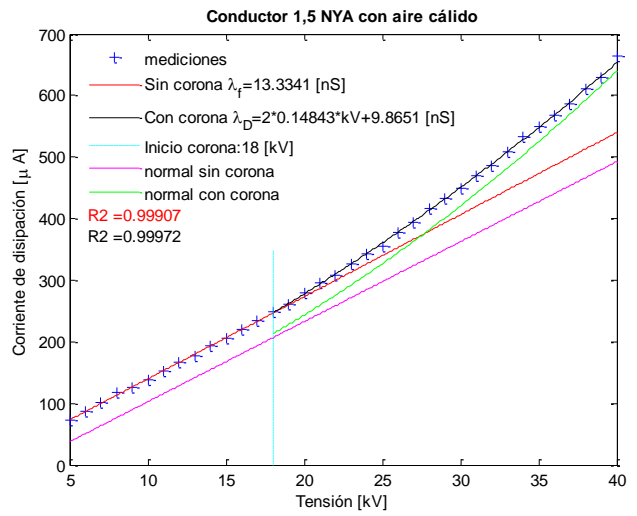
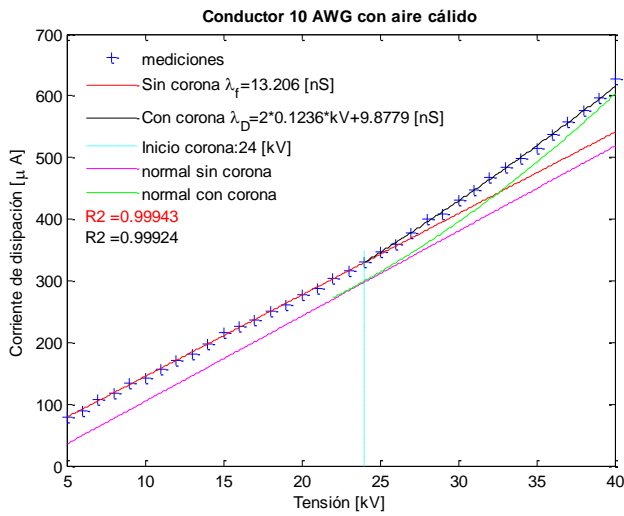
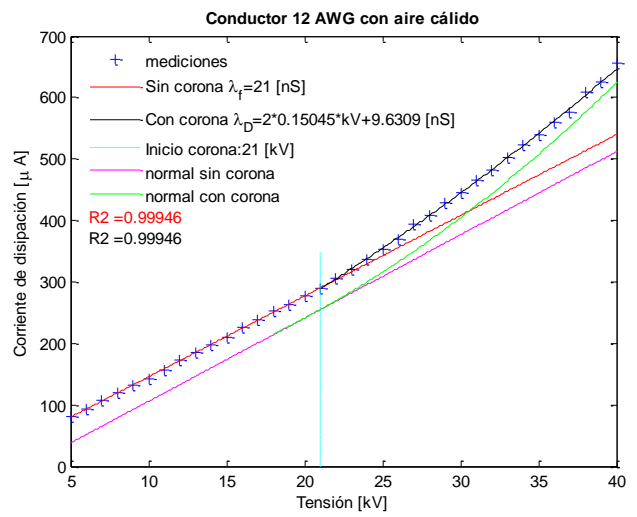
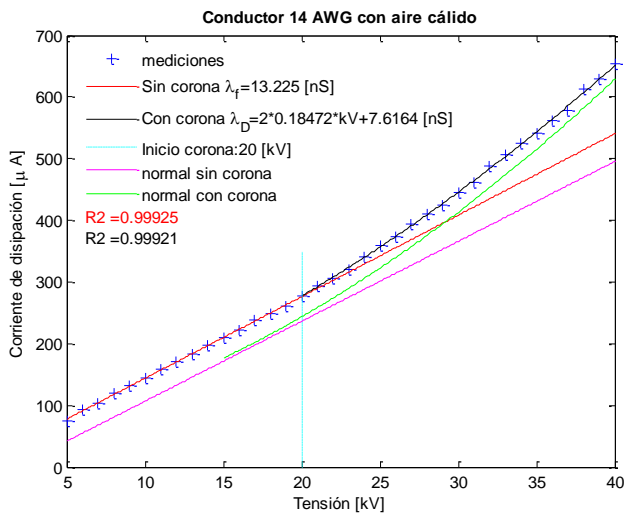


Ilustración 29: Resultados con conductor en aire cálido

4.2.6 Conductor con humo

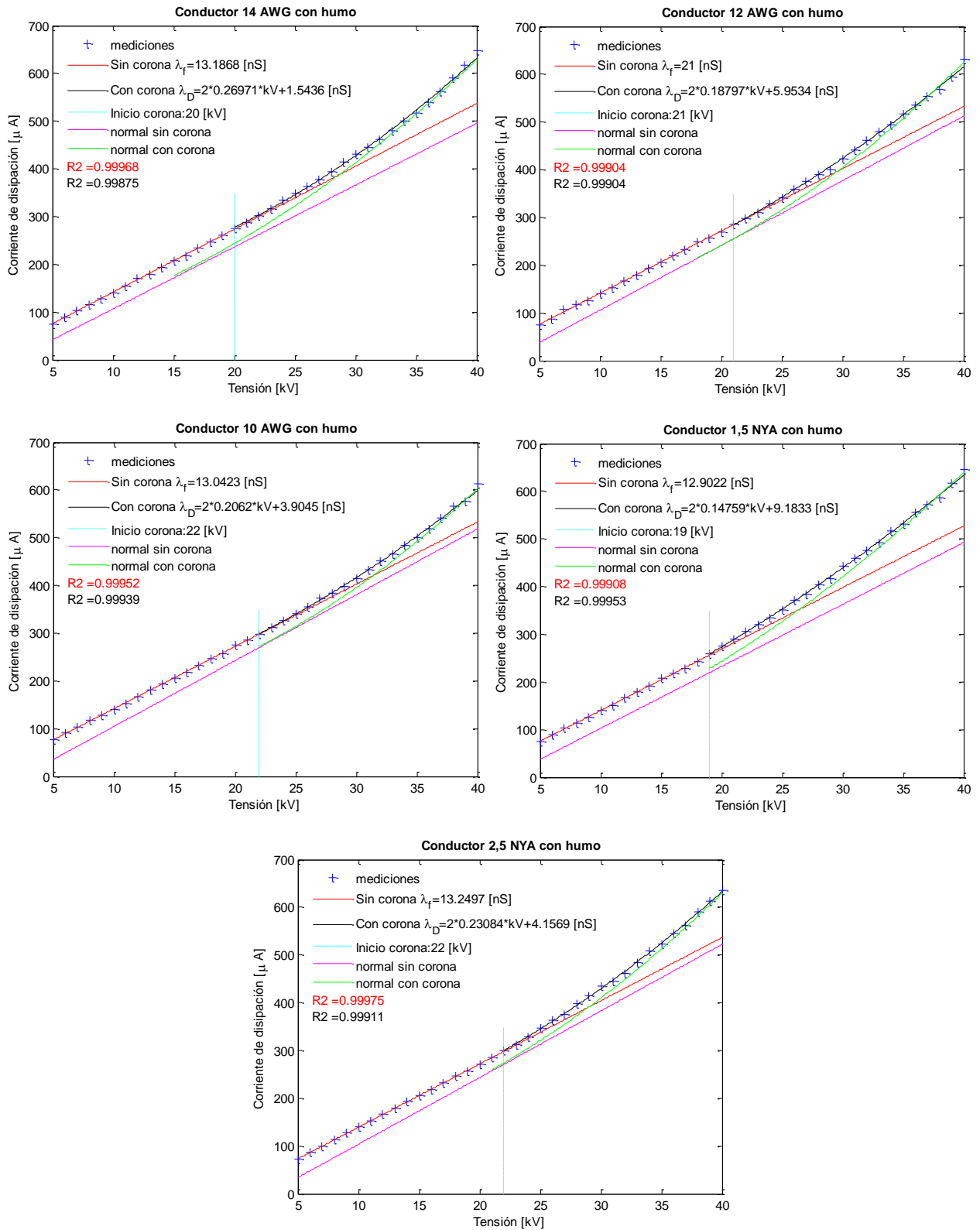


Ilustración 30: Resultados con conductor sometido a la presencia de humo

La última experiencia de laboratorio realizada fue para estudiar del efecto del humo, generado por la combustión de papel, sobre el efecto corona, con los resultados mostrados en la ilustración 30.

Los resultados obtenidos son bastante similares al caso de un ambiente cálido y seco porque la combustión aumenta la temperatura y disminuye la humedad del ambiente.

Nuevamente se presentó una excepción en el inicio del efecto en el cable 10 AWG que fue el único que mantuvo la tensión de inicio del fenómeno con respecto al caso normal, mientras que los conductores restantes lo aumentaron hasta en 5 [kV], es decir, el coeficiente m tomó nuevamente el valor 1,33, por ende, el campo eléctrico varió entre $2,98 \left[\frac{kV}{mm} \right]$ y $3,99 \left[\frac{kV}{mm} \right]$.

La conductividad de disipación presenta una mayor convexidad que el caso anterior y la conductividad del caso normal es levemente superior y es tal, que se traspone de muy buena forma sobre la nueva curva obtenida.

4.2.7 Resumen de resultados

Para resumir, se muestra en las siguientes tablas la tensión de inicio del fenómeno corona, el módulo del campo eléctrico entorno al conductor y la conductividad corona calculada para cada uno de ellos y para cada situación ambiental.

Como aclaración, la conductividad queda en función de los kilovoltios. Por ejemplo, la conductividad para el cable 12 AWG en el caso normal a los 30 [kV] es:

$$\lambda_c = 0,56 * 30 - 11,28 = 5,52 [nS]$$

Con esto se puede apreciar la variabilidad en el valor del campo eléctrico necesario para que comience el efecto corona, teniéndose un mínimo de $1,5 \left[\frac{kV}{mm} \right]$ y un máximo de $4,0 \left[\frac{kV}{mm} \right]$, lo cual supera los valores de ruptura dieléctrica del aire considerados al instante de diseñar la maqueta. Los rangos son mayores en los dos conductores más delgados que en los dos conductores más gruesos, donde se presentan diferencias de $2 \left[\frac{kV}{mm} \right]$ y $1,5 \left[\frac{kV}{mm} \right]$, respectivamente.

Con esto se ratifica que el valor del campo eléctrico de inicio de la descarga se ve influenciado principalmente por la presencia de agua en estado gaseoso, seguido por el agua condensada con presencia de sal y por agua condensada pura.

		14 AWG	12 AWG	10 AWG	1,5 NYA	2,5 NYA
Normal	Inicio [kV]	15	18	22	14	21
	$ \vec{E} \left[\frac{kV}{mm} \right]$	2,992	2,951	2,984	2,979	2,923
	λ_C [nS]	$0,463 \cdot kV - 7,61$	$0,563 \cdot kV - 11,28$	$0,6 \cdot kV - 14,04$	$0,420 \cdot kV - 5,78$	$0,556 \cdot kV - 11,46$
Rociado	Inicio [kV]	12	16	20	13	16
	$ \vec{E} \left[\frac{kV}{mm} \right]$	2,394	2,623	2,712	2,766	2,227
	λ_C [nS]	$0,253 \cdot kV - 2,45$	$0,273 \cdot kV - 2,44$	$0,377 \cdot kV - 7,07$	$0,297 \cdot kV - 2,87$	$0,322 \cdot kV - 3,69$
Rociado con sal	Inicio [kV]	11	13	15	12	14
	$ \vec{E} \left[\frac{kV}{mm} \right]$	2,194	2,132	2,034	2,553	1,948
	λ_C [nS]	$0,170 \cdot kV + 0,55$	$0,213 \cdot kV - 0,43$	$0,271 \cdot kV - 2,47$	$0,165 \cdot kV + 0,05$	$0,212 \cdot kV - 1,29$
Vapor	Inicio [kV]	10	11	11	9	11
	$ \vec{E} \left[\frac{kV}{mm} \right]$	1,995	1,803	1,492	1,915	1,531
	λ_C [nS]	$3,979 \cdot kV - 45,95$	$2,818 \cdot kV - 26,51$	$0,734 \cdot kV + 15,71$	$3,599 \cdot kV - 29,30$	$0,181 \cdot kV + 22,49$
Cálido	Inicio [kV]	20	21	24	18	20
	$ \vec{E} \left[\frac{kV}{mm} \right]$	3,990	3,443	3,225	3,830	2,784
	λ_C [nS]	$0,369 \cdot kV - 5,60$	$0,301 \cdot kV - 3,50$	$0,247 \cdot kV - 3,32$	$0,296 \cdot kV - 3,46$	$0,321 \cdot kV - 4,40$
Humo	Inicio [kV]	20	21	22	19	22
	$ \vec{E} \left[\frac{kV}{mm} \right]$	3,990	3,443	2,984	4,043	3,062
	λ_C [nS]	$0,539 \cdot kV - 11,64$	$0,375 \cdot kV - 7,08$	$0,412 \cdot kV - 9,13$	$0,295 \cdot kV - 3,71$	$0,461 \cdot kV - 9,09$

Tabla 7: Resumen de resultados para conductores utilizados

4.3 Pérdidas por efecto corona

4.3.1 Resultados experimentales

Conocidas las conductividades es posible deducir cuánta potencia se disipa por efecto corona en cada caso. Esta potencia depende del largo del conductor, por lo que los valores se normalizan para obtener resultados por unidad de longitud. Considerando que los conductores utilizados eran de 70 centímetros de largo, se tiene:

$$P \left[\frac{W}{m} \right] = \lambda_c V^2 \cdot \frac{10}{7}$$

En la ilustración 31 se muestran los resultados obtenidos, agrupados para cada tipo de conductor.

Destaca que, para la atmósfera con vapor, las pérdidas son mucho mayores que en cualquier otra situación, para cualquier tipo de cable, alcanzando valores de hasta $55 \left[\frac{W}{m} \right]$ a los 25 [kV], como ocurre en el conductor más delgado. En este caso y tal como se esperaba, las pérdidas son mayores entre más pequeño es el conductor, pues mayor es el campo eléctrico y, por ende, la intensidad del efecto corona.

Para todas las otras condiciones de operación, las pérdidas por efecto corona son bastante similares, alcanzando valores entre los $15 \left[\frac{W}{m} \right]$ y los $25 \left[\frac{W}{m} \right]$ a los 40 [kV]. Se puede apreciar que las pérdidas en la situación normal parten siendo menores pero entorno a los 30 [kV] superan a todas las otras condiciones ambientales, puesto que el coeficiente de la conductividad asociado a la tensión era mayor que los casos restantes. Tal como ya se señaló, esto puede deberse al hecho de que las partículas de agua y sal poseen mayor masa y movilizarlas es más difícil, por lo que la conductividad termina siendo claramente menor.

Como el efecto corona comienza antes para las situaciones con agua rociada, ya sea con o sin sal en el ambiente, las pérdidas comienzan siendo mayores pero no presentan un incremento mayor. Luego, en este modelo a escala no se pudo comprobar una relación directa entre el valor de inicio del efecto corona y las pérdidas por este fenómeno a tensiones mayores.

La situación cálida presenta un comportamiento muy similar a la condición con humo, con curvas levemente desplazadas pero con igual forma y valores muy similares. Solo en el conductor 14 AWG las pérdidas en atmósfera con humo terminan alcanzando un valor mayor tras los 35 [kV], pero en tensiones bajo esta y en las otras situaciones, las pérdidas en la atmósfera cálida son mayores.

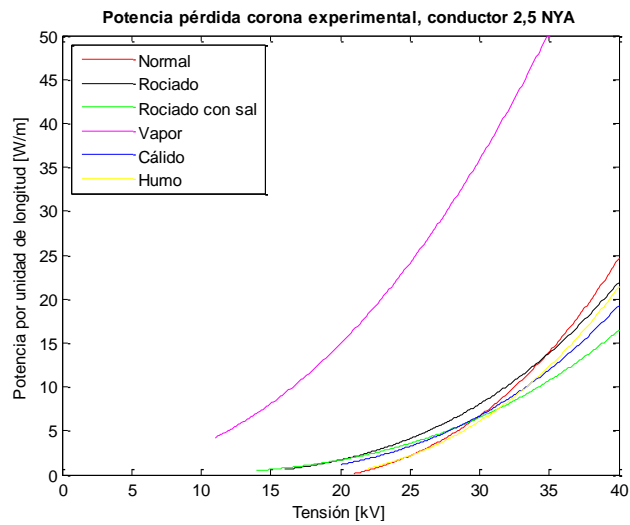
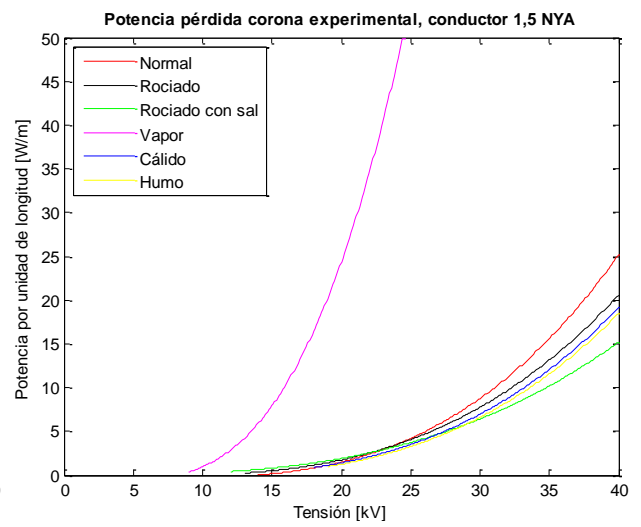
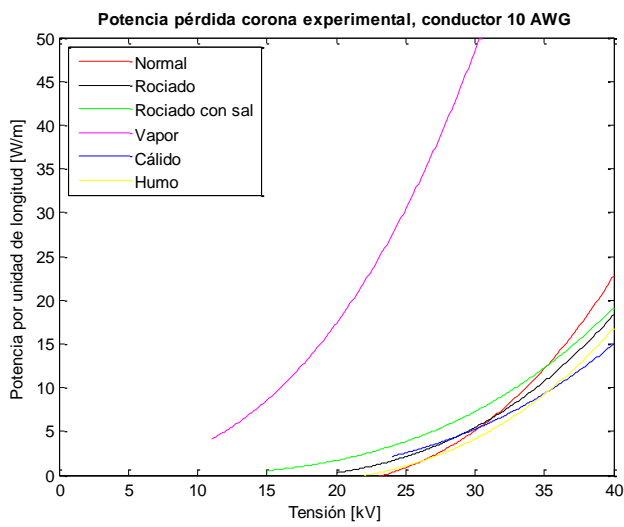
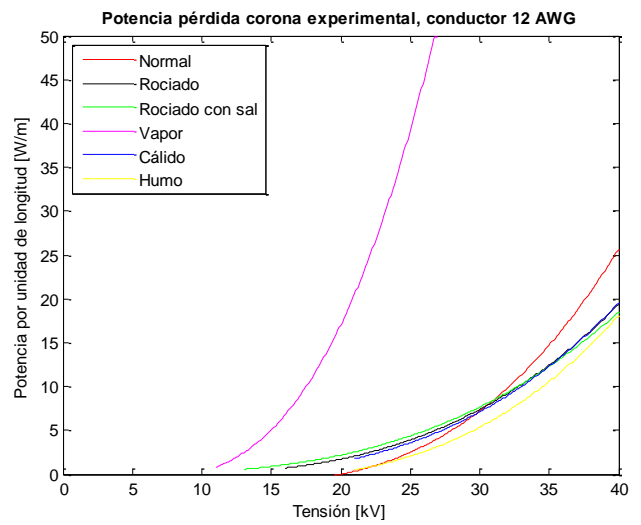
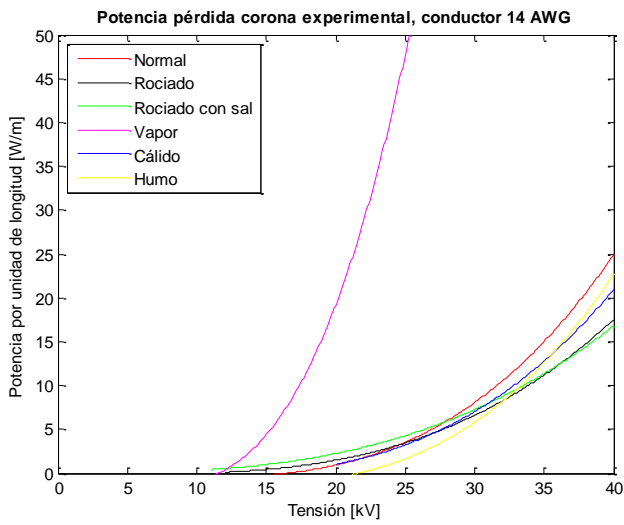


Ilustración 31: Potencia experimental de pérdida corona

4.3.2 Comparación con resultados teóricos según método de Peek

En el marco teórico se presentaron tres métodos para calcular las pérdidas por efecto corona, todas ellas de origen empírico. La fórmula de Peek, mostrada en 2.4.1, es el método más tradicional de cálculo y sugiere una forma cuadrática de las pérdidas al igual que lo obtenido experimentalmente.

La fórmula de Peek está pensada para sistemas trifásicos, utilizando entre sus variables la distancia efectiva entre fases. Para poder usarla en este caso, se consideró la distancia entre el conductor y tierra. Además, se utilizaron los valores del parámetro m obtenidos experimentalmente: 1 para el caso normal, 0,7 para el caso rociado, 0,6 para el caso rociado con sal, 0,5 para el caso con vapor y 1,2 para los casos cálido y con humo.

Los resultados obtenidos, que se observan en la ilustración 32, muestran valores menores a los resultados experimentales alcanzados en todos los casos, con potencias entre dos a tres veces menores, a excepción del caso con vapor donde prácticamente no hay comparación pues se alcanzan valores de hasta un orden de magnitud menor. Sin embargo, resulta interesante apreciar que, a pesar de que la fórmula de Peek está obtenida empíricamente para sistemas reales, entrega una buena aproximación de lo que ocurre en el laboratorio creado.

Aunque los valores no son tan cercanos como se desearía, la forma de las curvas son parecidas y la potencia aumenta cuando el efecto ya se hace sumamente notorio. Sin embargo, las curvas no muestran cruces como sí ocurrió en las mediciones experimentales, pues en aquellas, las pérdidas solo dependen de la tensión y del inicio del fenómeno, a diferencia del caso estudiado en el modelo a escala donde la conductividad considera el comportamiento del fenómeno corona para un buen rango de tensión.

Dada la dependencia del factor m , las pérdidas son mayores mientras menor es el valor de aquel. Así, las mayores pérdidas las presenta el conductor sometido a vapor, seguido, en orden decreciente, por el caso rociado con agua y sal, el caso rociado, el caso normal y los casos cálido y con humo.

En los 3 casos con más pérdidas no se muestran mayores diferencias en los diversos conductores, al diferencia de los 3 casos con menos pérdidas donde hay diferencias de hasta $2 \left[\frac{W}{m} \right]$ a los 40 [kV]. Como el campo eléctrico es más intenso en los conductores menores, estos deberían presentar pérdidas mayores en todos los casos, algo que no es previsto por la fórmula de Peek por ser obtenida para conductores de transmisión reales.

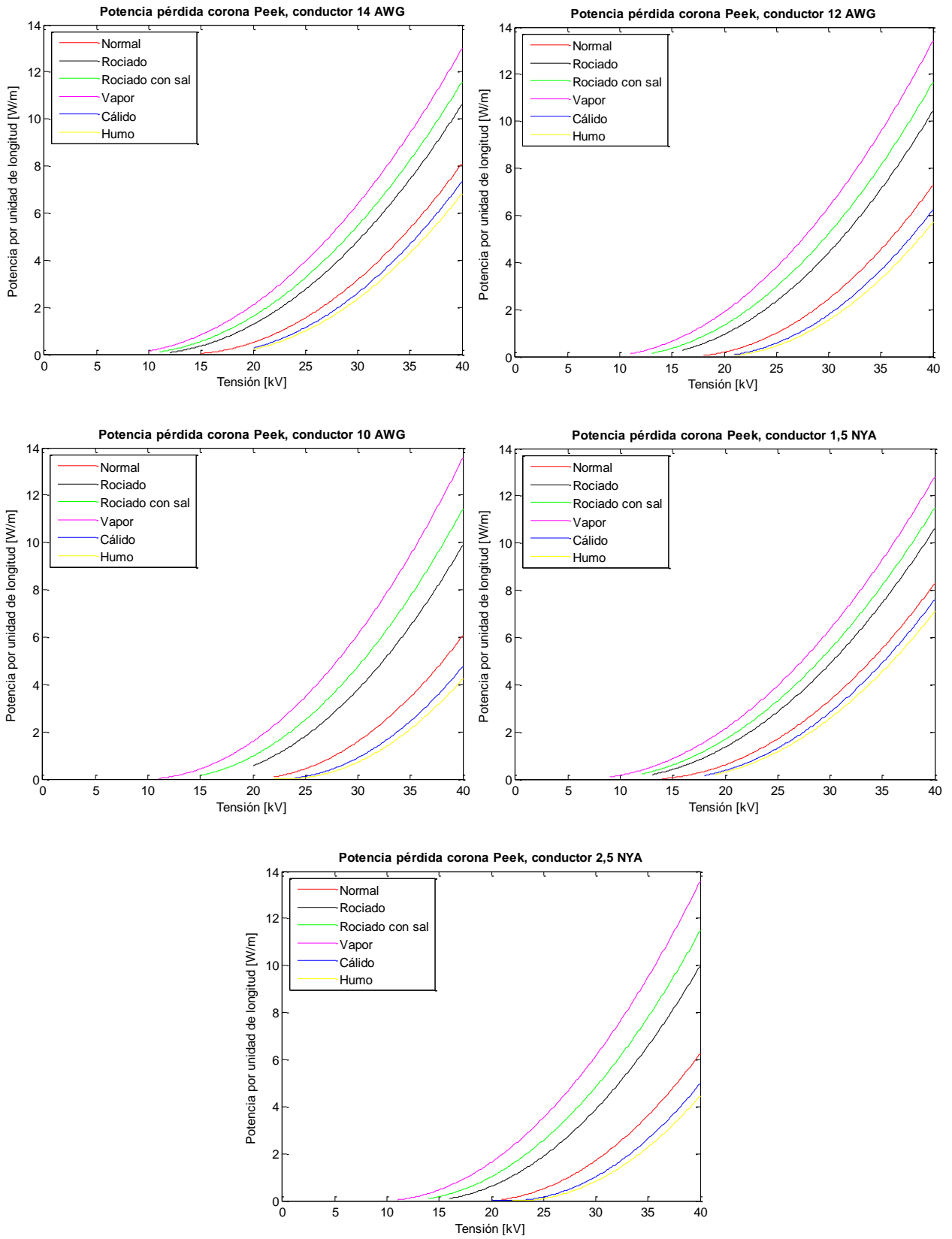


Ilustración 32: Pérdidas según fórmula de Peek

4.3.3 Comparación con resultados teóricos según método de Peterson

El segundo método presentado es el método de Peterson que diferencia conductores cilíndricos y conductores con hebras. Luego, para calcular la potencia de pérdida se usó la ecuación (12) en el caso de los alambres y la ecuación (15) en el caso de los cables.

Dado que solo se posee las imágenes de la función de Peterson y no una relación funcional entre el factor ϕ y el cociente V/e_d , se realizó una aproximación de la función. Esto llevó a obtener pequeños errores como en el caso de la curva para la potencia de pérdida en el conductor 10 AWG en condiciones normales que presenta una mayor concavidad que las otras curvas, debido a que el factor ϕ tiene una forma distinta para los valores bajo 2.6 y otra para los valores sobre este. En este cálculo se utilizaron los mismos valores del parámetro m que en el caso del método de Peek y también se consideró la altura del conductor en vez de la distancia efectiva entre fases.

Las curvas obtenidas para los 5 conductores y las 6 condiciones se muestran en la ilustración 33.

Aunque este método presenta mejores aproximaciones en el caso de conductores de más de una pulgada de diámetro, se aleja levemente de lo obtenido por el método de Peek, con diferencias de potencias por unidad de longitud entorno a los 3 $\left[\frac{W}{m}\right]$ a los 40 $[kV]$, una diferencia mucho menor a lo esperado.

Dado que este método diferencia entre alambres y cables, este método predice menores pérdidas para los primeros cuando los conductores son de calibre similar. Así, el alambre 1,5 NYA presenta pérdidas de 1 $\left[\frac{W}{m}\right]$ menos que el cable 14 AWG, situación que se repite al comparar el alambre 2,5 NYA y el cable 12 AWG. Experimentalmente, no se aprecia una diferencia clara entre tipo de conductor.

La forma de la curva sigue siendo muy similar a los dos gráficos anteriores, con lo cual se ratifica que las pérdidas por efecto corona son una función cuadrática de la tensión, con pérdidas mucho mayores cuando el fenómeno es más intenso.

4.3.4 Comparación con resultados teóricos según método de Electricité de France

En el método de la Electricité de France, como se explicó en 2.4.3, se debe recurrir al cociente entre el gradiente máximo del haz y el campo eléctrico crítico del subconductor liso para calcular el valor del factor P_0 de la ecuación (17) y cuyo valor se muestra en la ilustración 6. Por una parte, no se utilizaron conductores en haz sino un conductor simple y por otro lado, las tensiones aplicadas hacen que campo eléctrico entorno al cable sea mayor que el campo eléctrico crítico, con lo que el cociente entre campo eléctrico máximo y campo eléctrico es mayor que uno, dejando fuera de rango la ilustración señalada. Así, este método no es aplicable al modelo a escala.

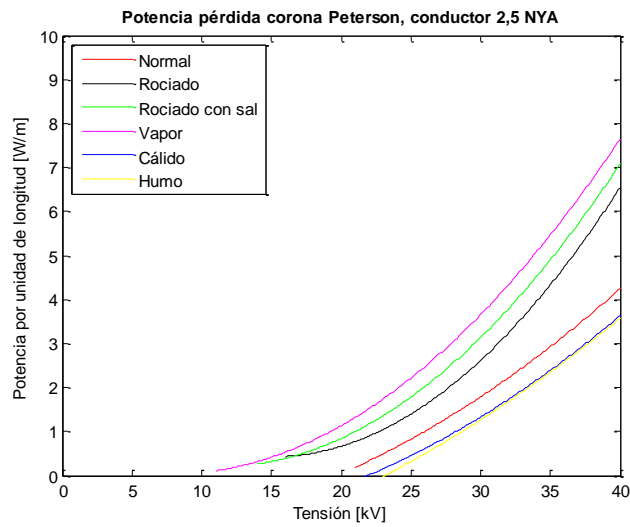
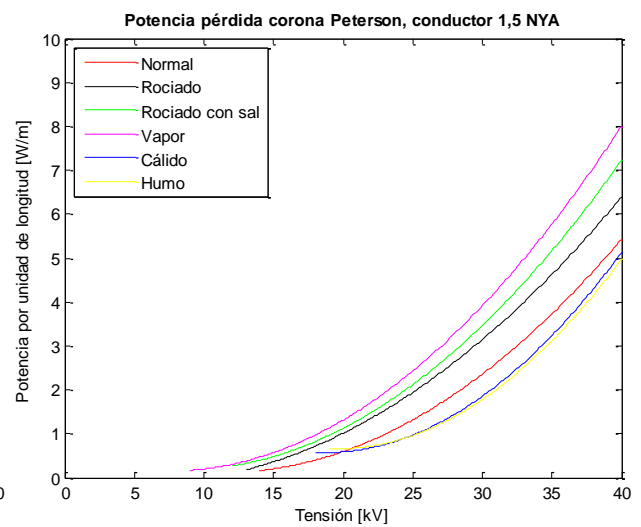
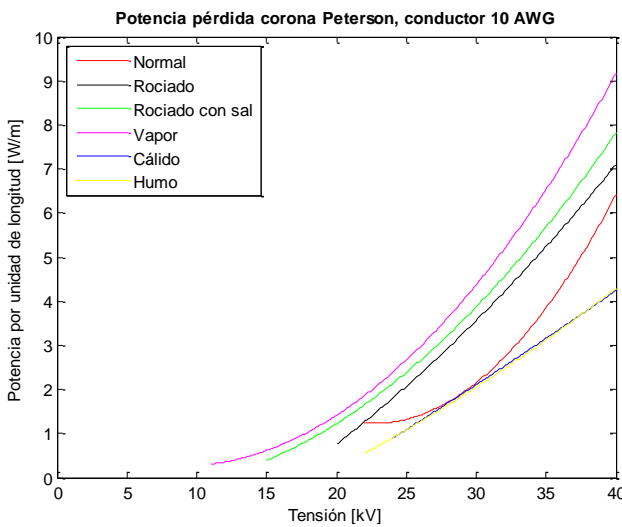
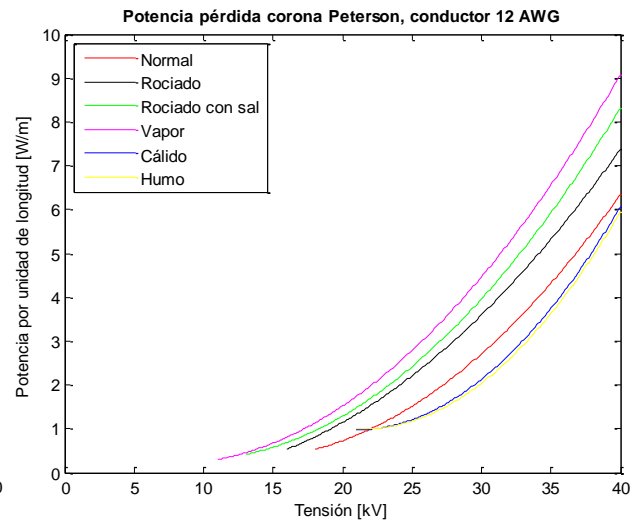
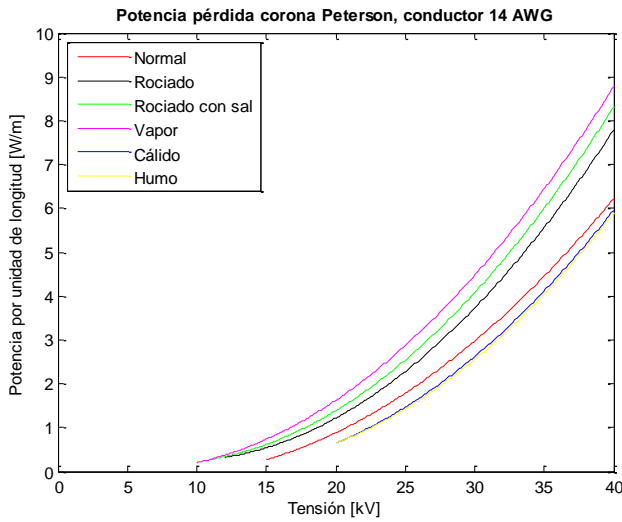


Ilustración 33: Pérdidas según fórmula de Peterson

4.3.5 Comparación con cálculos para líneas reales ^[8]

Para verificar que los resultados obtenidos para la potencia de pérdida corona en el modelo a escala están dentro de los órdenes de magnitud de un caso real, los resultados anteriores se contrastarán con una situación de una línea de transmisión real.

En la bibliografía consultada se encuentran los cálculos teóricos realizados para determinar, a través del método de Peek, la potencia de pérdida en una línea de 500 kV que uniría Quito con Guayaquil, en Ecuador. Los cálculos se realizan considerando un circuito simple, con una torre cuyos conductores están en disposición horizontal con 3 ó 4 subconductores y dos diferentes rutas de largos 289 [km] y 315 [km]. Además, se consideran los cálculos para situaciones secas y húmedas, donde se tomaron los valores 1 y 0,8 para el coeficiente m , respectivamente.

Aunque las condiciones atmosféricas de dicha línea varían a lo largo de aquella, se rescata de dicho trabajo las pérdidas por unidad de longitud por cada fase como la simple división de la potencia total disipada por el largo de la línea y posteriormente dividido por 3 para considerar el valor por cada fase.

	Ruta 1: 289 [km]		Ruta 2: 315 [km]	
	3 subconductores	4 subconductores	3 subconductores	4 subconductores
Húmedo	67,01	41,44	20,97	12,15
Seco	2,50	-	0,53	-

Tabla 8: Pérdidas en $\left[\frac{W}{m \text{ fase}}\right]$ por efecto corona en una línea de 500 kV

Tal como se puede apreciar, las pérdidas en una condición húmeda tienen un valor dentro del rango de valores que se obtuvieron experimentalmente con los conductores de menor calibre. En la situación seca, para la ruta 1, se obtienen valores cercanos a los obtenidos en la maqueta y en la ruta 2, valores algo menores.

Así, queda claro que el modelo a escala entrega valores de potencia de pérdidas corona representativos de la realidad que se intentó simular en sus diversas condiciones atmosféricas, mostrando que es un método interesante para realizar aproximaciones cuando no se tiene mayor información real del comportamiento de las líneas de transmisión en este ámbito.

4.4 Fuentes de error del modelo implementado

Aunque el modelo a escala mostró ser exitoso para estudiar el inicio del efecto corona y estimar experimentalmente las pérdidas de una línea ante diversas situaciones, existen varias fuentes de error que evitan una mayor exactitud en los resultados.

Las elipses y tensores utilizados son conductores por lo que también se puede producir efecto corona entorno a ellos. Además, los tensores tienen una punta en donde se colocan los

conductores lo cual influye fuertemente en la generación del fenómeno, pues el campo eléctrico, por el efecto punta, se concentra en aquellos lugares. Esto hace que el fenómeno comience a presentarse un poco antes de lo esperable en un caso ideal. De todas formas, se pudo apreciar que los valores teóricos con los experimentales de la tensión necesaria para el inicio del fenómeno en el caso normal fueron bastantes cercanos a los obtenidos experimentalmente.

Estos elementos también presentan pérdidas por efecto corona cuando el fenómeno está presente, por lo que la potencia de pérdida aumenta con respecto al caso ideal, ya que hay una mayor conductividad corona debido a dichos elementos que entregan un mayor largo de superficie conductora.

También la conexión desde el transformador al cable de alimentación que se dirigía a la maqueta presenta efecto punta, con las mismas consecuencias ya señaladas.

Cuando las tensiones alcanzaron valores elevados, se pudo apreciar conducción por los soportes acrílicos de los tensores en los casos de agua rociada, con y sin sal, o vapor de agua. Aunque dichas mediciones se desecharon para obtener mejores resultados, es muy probable que haya habido conducción eléctrica no apreciable por el observador. Como los valores de corriente de disipación medidos son bastante bajos, dicha conducción afecta a los valores de potencia de pérdida por efecto corona obtenidos experimentalmente.

Además, para realizar las comparaciones de potencia de pérdida en el caso teórico se debieron adaptar las fórmulas de Peek y Peterson, donde se cambió la distancia efectiva entre fases a la altura entre conductor y tierra. Dicha adaptación como las pérdidas por efecto corona en las elipses y tensores son las principales causas de la diferencia de los valores teóricos y los valores obtenidos experimentalmente.

Otras fuentes de error con un efecto mínimo sobre los resultados son la contaminación armónica de la alimentación a la línea, que podía dificultar la detección del inicio del fenómeno, y el control análogo de la tensión que se realizaba a través de una manilla en el control del transformador, como se puede apreciar en la ilustración 18.

Para obtener mejores resultados en el modelo, es aconsejable colocar una línea trifásica dentro de la caja acrílica que pueda representar mejor la realidad. También hubiese sido interesante poder controlar de mejor forma las variables atmosféricas e intentar entender de forma más detallada cómo afectan aquellas, instaurando mayores condiciones atmosféricas a estudiar. Todo esto no fue posible en este trabajo pues no se contaba con la indumentaria ni los recursos necesarios para aquello.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

A través de este trabajo se buscó la forma de estudiar en un laboratorio a escala el efecto corona, haciendo hincapié en cómo afectan las condiciones atmosféricas y ambientales en el inicio de la descarga y en el comportamiento una vez que el fenómeno ya está presente.

El modelo a escala diseñado fue exitoso para la obtención de mediciones en diversas situaciones. La alimentación eléctrica fue lograda con facilidad a través del transformador de potencial, con la oportunidad de variar la tensión desde su control, alcanzando los 40 [kV]. La caja acrílica fue un buen espacio para variar las condiciones ambientales y poder estudiar el fenómeno; las propiedades del material, ya sea su transparencia, su buen comportamiento como aislante y su baja masa, facilitaron el transporte, el trabajo y permitieron realizarlo de forma segura.

Mención especial merece el sistema diseñado para poder detectar el efecto corona. Con una simple antena parabólica diseñada de forma artesanal y un osciloscopio se pudo detectar la forma de onda de la tensión inducida en ella y, a través de las distorsiones de esta señal, detectar el inicio del efecto corona. Así, no se necesitan costosos aparatos para poder detectarlo y para determinar su existencia en situaciones reales, cuando el fenómeno no es audible ni visible aun, podría bastar un osciloscopio que funcione con batería y una antena que pueda dirigirse de forma precisa hacia la línea de transmisión.

Con lo mencionado, no es necesario contar un laboratorio de alta tensión para poder estudiar el fenómeno, sino que basta contar con los elementos señalados, un espacio amplio que entregue distancias seguras para quien realiza las experiencias y una toma a una puesta a tierra simple que permita generar un plano equipotencial y que sirva de protección en caso de alguna descarga.

Al realizar las primeras mediciones quedó claro que se puede lograr la ruptura dieléctrica del aire con una tensión reducida si se opera con un conductor pequeño. De esta forma, con 15 [kV] ya se puede observar el fenómeno en un cable 14 AWG o en un alambre 1,5 NYA desnudos. En condiciones normales de operación, es decir, a 25 [°C] y con un 60 % de humedad relativa, la ruptura dieléctrica del aire se alcanza efectivamente a los $2,98 \left[\frac{kV}{mm} \right]$, aplicando la tensión necesaria según el conductor utilizado. Es decir, la situación ideal para el inicio del efecto corona sí es replicable. Luego, el valor del gradiente superficial de Peek no es válido para conductores de tan pequeño calibre como los utilizados en este modelo a escala.

El efecto corona de este trabajo se puede modelar como dos resistencias en paralelo, una de ellas representando la corriente de fuga propia de todo el sistema eléctrico de alimentación y la otra, conectada en serie a un doble diodo, representando el efecto corona. Al calcular la corriente de disipación efectiva en función de la tensión efectiva aplicada y compararla con la curva experimental obtenida en la condición normal de operación, se aprecian resultados bastantes similares, lo que lleva a una nueva forma de analizar el efecto corona: obtener la conductancia de fuga de este fenómeno.

Al realizar un ajuste para obtener la relación entre la corriente de disipación y la tensión aplicada, se observa que la conductancia corona no es constante y que es una función que depende de forma lineal de la tensión a la cual está sometida el conductor. De esta forma, la corriente disipada por el fenómeno corona depende del cuadrado de la tensión aplicada.

Dentro de la caja acrílica se modificaron las condiciones atmosféricas que llevan a concluir que la situación más adversa para el inicio del efecto corona es el vapor de agua, siendo una situación peor que el agua condensada en el conductor o la presencia de una atmósfera salina. El inicio del efecto corona en el primer caso se redujo hasta en un 50% mientras que en los otros dos, entre un 20% a un 35%. Diametralmente opuesto se encuentran las situaciones de atmósfera cálida o con humo, donde se necesitó una mayor tensión y, por ende, un mayor campo eléctrico, para el inicio del efecto corona, con valores entorno a un 20% mayor.

A partir de lo anterior se deben dirigir los esfuerzos de mantenimiento y de diseño de líneas en aquellas zonas del país donde se observe constantemente niebla o neblina, es decir, las zonas costeras y aquellos valles de muy poca altitud donde se desarrollan microclimas. Ejemplo de estas son las líneas de transmisión de la IV y V regiones: Nogales – Los Vilos, Los Vilos – Las Palmas, Las Palmas – Pan de Azúcar, todas ellas en 220 [kV] y las líneas de transmisión de la zona poniente de la región Metropolitana: Chena – Cerro Navia y Cerro Navia – Polpaico en 220 [kV] como la línea Alto Jahuel – Polpaico en 500 [kV].

En el caso de las pérdidas por efecto corona, destacan las pérdidas en la situación con vapor de agua, donde se alcanzan valores 9 a 11 veces mayores que los casos restantes. Así, en el conductor más grueso, a los 30 [kV] se presenta una potencia de pérdida por unidad de longitud de $50 \left[\frac{W}{m} \right]$ y en las situaciones restantes solo se presentan alrededor de $6 \left[\frac{W}{m} \right]$, mientras que en el conductor más delgado, la situación con vapor entrega $55 \left[\frac{W}{m} \right]$ de pérdidas a 25 [kV] y en las situaciones restantes solo $5 \left[\frac{W}{m} \right]$ en esta tensión.

En aquellas atmósferas sin vapor de agua se obtienen pérdidas similares, que alcanzan valores entre $15 \left[\frac{W}{m} \right]$ y $25 \left[\frac{W}{m} \right]$ cuando el conductor se somete a 40 [kV]. Por otra parte, todas las curvas presentan formas similares, donde las curvas para los conductores con agua y agua con sal presentan menor pendiente, por lo que sus pérdidas terminan siendo menores que los otros casos en la tensión máxima.

De las fórmulas teóricas para calcular las pérdidas, solo la de la Electricité de France queda fuera de rango, mientras que la fórmula de Peek entrega una mejor aproximación que la fórmula de Peterson. Aunque las pérdidas deducidas experimentalmente doblan a las pérdidas según Peek, que esta fórmula haya podido entregar una buena aproximación, siendo que es una fórmula empírica para sistemas trifásicos reales, significa el método de cálculo de pérdidas usado es bastante aceptable, considerando también que las fórmulas teóricas fueron adaptadas para poder realizar el cálculo de potencias de pérdida.

Finalmente, se verifica que los valores obtenidos en el modelo a escala si representan situaciones reales lo que queda claro al comparar las potencias de pérdida por unidad de longitud obtenidas en el laboratorio con las pérdidas de una línea real. Así, si se logran replicar fehacientemente las condiciones atmosféricas y ambientales de una línea en el interior de la caja acrílica, se podrán obtener valores de potencia disipada cercanos a la situación real.

Con esto se muestra que el trabajo realizado no solo tiene un fin académico, sino que también puede ser de interés para las empresas de transmisión que deseen determinar pérdidas por efecto corona en sus instalaciones o en el estudio de futuras líneas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] **Morales, Nelson.** *Fenómeno corona en líneas aéreas.* Santiago, Chile: Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica. 1986.

[2] **González, Jaime.** Efecto Corona. *Redes de energía eléctrica.* Santiago, Chile: Subgerencia de producción, ENDESA. 1982.

[3] **Turbay, Julio y Lorenzón, Germán.** *Efecto Corona.* Santa Fe, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional Santa Fe, Departamento de Electrotecnia. 2011

[4] **Peek, F.W.** *Dielectric phenomena in high-voltage engineering.* 2da Ed. Nueva York, Estados Unidos: Mc-Grow Hill Book Company. 1920.

[5] **Saad, Djedjiga.** *Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques.* Tizi-Ouzou, Argelia: Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Departament d'Electrotechnique. 2011.

[6] **Kadi, Hocine.** *Influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension.* Tizi-Ouzou, Argelia: Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Departament d'Electrotechnique. 2012.

[7] **Bianchi, Ernesto.** *Líneas conductoras de energía eléctrica.* Santiago, Chile: Universisad de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2013

[8] **Buenaventura, Julitza; Velásquez, María y Layana, José.** *Pérdidas por efecto corona en la línea de transmisión de 500 kV Quito-Guayaquil.* Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2011.