

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Eléctrica y electrónica



TESIS

**Diseño y aplicación de metodología en dimensionamiento de
anillos correctores, reduciendo el estrés eléctrico en aisladores
poliméricos**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Electricista.

Elaborado por

Bryan Felix Malpartida Campos

 [0009-0008-8303-552X](https://orcid.org/0009-0008-8303-552X)

Asesor

Dr. Moisés Ariste Flores Tinoco

 [0000-0003-3325-9994](https://orcid.org/0000-0003-3325-9994)

LIMA – PERÚ

2023

**DISEÑO Y APLICACIÓN DE METODOLOGÍA EN
DIMENSIONAMIENTO DE ANILLOS CORRECTORES,
REDUCIENDO EL ESTRÉS ELÉCTRICO EN AISLADORES
POLIMÉRICOS**

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo a mi querida madre Mayela Campos Solórzano, ya que sin su infinito e incondicional apoyo este trabajo no se hubiese concretado. Agradezco a la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería por haberme brindado los conocimientos y herramientas tecnológicas necesarias para poderme desarrollar como profesional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres Mayela y Félix por su apoyo incondicional durante el tiempo que pase bajo su cuidado, sus consejos y valores que inculcaron en mi han sido semillas para la culminación de esta etapa y el desarrollo del presente trabajo.

Agradezco al Ing. Justo Yanque Montufar por brindarme los conocimientos necesarios en el curso de alta tensión, proveerme de información inédita y centrar el tema. De igual forma al Prof. Dr. Ing. Moisés Flores Tinoco y al Prof. Dr. Joel Villavicencio Gastelu por su valioso tiempo en la revisión del documento, interés en el tema, y por sus comentarios y sugerencias para la mejora del presente documento. También al Dr. Ing. Cesar Moreno Cueva por compartir conmigo su experiencia en el desempeño de los aisladores en líneas de transmisión de alta tensión. También al Ing. Miguel Delgado por guiarme en los métodos de simulación de equipamiento eléctrico. Agradezco mucho la participación de la Dra. Ing. Judith Luz Betetta Gomez en la etapa final del trabajo. Finalmente, agradezco a mis colegas M. Sc. Cristian Paul Arroyo Quispe y M. Sc. Zorah Ahmad, por su apoyo durante la redacción del documento.

A todos, muchas gracias.

RESUMEN

Durante la operación de líneas de transmisión de alta tensión, la superficie de los aisladores está sometida a elevados gradientes de tensión. Esos gradientes propician la aparición de descargas parciales en las superficies de los aisladores, especialmente, en el lado del conductor de fase. Esas descargas causan el envejecimiento prematuro del material dieléctrico del aislador, por lo que, generalmente, se utilizan accesorios (anillos) correctores de campo eléctrico. Estos accesorios permiten mitigar la aparición de altos valores de campo eléctrico en la superficie de los aisladores. En esta tesis se propone el diseño y aplicación de una metodología en dimensionamiento de anillos correctores para reducir el estrés eléctrico en aisladores poliméricos de líneas de transmisión de alta tensión, ante condiciones climáticas. La metodología permite obtener los parámetros espacio – geométricos de accesorios correctores más adecuados, que ayuden a mitigar altos valores de campo eléctrico en los aisladores. El campo eléctrico a lo largo del aislador se obtiene usando el método de elementos finitos. La metodología propuesta fue aplicada en un modelo virtual de una estructura perteneciente a una línea de transmisión de 500 kV, considerando como accesorios correctores el anillo anti corona y el anillo de distribución de campo. El potencial y campo eléctrico es calculado para diferentes condiciones climáticas: seca, de lluvia y contaminada. Entre los resultados más importantes están la obtención de la distribución del campo y potencial eléctrico en la superficie de los aisladores, así como la determinación de parámetros de diseño de accesorios correctores de campo eléctrico más favorables. La metodología propuesta está orientada al diseño de los accesorios previo a la fabricación, pero también ofrece herramientas innovadoras a los ingenieros de líneas de transmisión, mostrando que es posible disminuir el riesgo de fallas por rotura en aisladores poliméricos. Esta metodología puede expandirse y aplicarse a cualquier equipamiento de alta tensión, además los parámetros más favorables obtenidos servirán de referencia para los ingenieros interesados en el diseño o adquisición de este tipo de accesorios en 500 kV.

Palabras clave: *Alta tensión, aisladores poliméricos, descargas parciales, anillos correctores de campo eléctrico, estrés eléctrico, método de elementos finitos.*

ABSTRACT

During the operation of HV transmission lines, the surface of the insulators is under high voltage gradients. These gradients promote the appearance of partial discharges on the surfaces of the insulators, especially on the HV side. These discharges cause premature aging of dielectric materials, so corona control products (rings) like corona rings and equalizing ring are needed. These accessories mitigate the appearance of high values of E-field along insulators. This thesis proposes a design and application of a methodology for dimensioning corrector rings to reduce electrical stress in composite insulators of HV transmission lines, under climatic conditions. The methodology allows to obtain the most suitable spatial-geometric arrange of corrective accessories to mitigate the high values of E-field on the insulators. The E-field along insulator is obtained by FEM. The proposed methodology was applied in a virtual model of a structure belonging to a 500 kV transmission line, considering as corrective accessories the corona ring and the equalizing ring. The E-field is calculated for different climatic conditions: dry, wet and polluted. Important results were obtained, like the distribution of the E-Field and potential on the surface of the insulators, as well as determination of better design parameters for E-field correction accessories. The proposed methodology is oriented to the design of accessories prior to their manufacture, but it also offers innovative tools to transmission line engineers, showing that it is possible to reduce the risk of failures due to breakage in composite insulators. This methodology can be expanded and applied to any high voltage equipment, in addition the most favorable parameters obtained will be useful for engineers interested in the design or acquisition of this kind of accessories at 500 kV.

Keywords: *High voltage, composite insulators, partial discharges, corona rings and grading rings, electrical stress, finite element method.*

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xv
PRÓLOGO	xvii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	2
1.3 Antecedentes investigativos.....	3
1.4 Objetivos del estudio	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
1.5 Hipótesis	6
1.5.1 Hipótesis generales.....	6
1.5.2 Hipótesis específicas	6
1.6 Alcances.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	7
2.1 Marco teórico.....	7
2.1.1 La medición del campo eléctrico en aisladores poliméricos.....	7
2.1.2 Introducción al método de elementos finitos	8
2.1.3 Aisladores poliméricos	9
2.1.4 Accesorios correctores de campo eléctrico	14
2.2 Marco conceptual.....	19

2.2.1	Potencial y campo eléctrico.....	20
2.2.2	Modelo para cálculo de tensión en la superficie de aisladores poliméricos.....	20
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA EN DIMENSIONAMIENTO DE ANILLOS		
CORRECTORES		23
3.1	Introducción.....	23
3.1.1	Curva característica de campo eléctrico.....	23
3.1.2	Pasos para determinar el campo eléctrico usando método de elementos finitos	24
3.1.3	Pasos para determinar el campo eléctrico usando programas computacionales	29
3.1.4	Técnica de barrido paramétrico.....	29
3.1.5	Variables, dimensiones e indicadores metodológicos.....	30
3.1.6	Indicadores y criterios de selección	31
3.2	Flujograma de la metodología propuesta.....	32
3.2.1	Flujograma 1	33
3.2.2	Flujograma 2	35
CAPÍTULO IV: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....		37
4.1	Introducción.....	37
4.2	Datos de entrada	38
4.2.1	Datos del aislador	38
4.2.2	Datos de los accesorios correctores.....	38
4.2.3	Parámetros físicos de los materiales.....	39
4.2.4	Valores de frontera	40
4.3	Definición de escenarios de análisis	40
4.3.1	Condición seca	40
4.3.2	Condición de lluvia	41
4.3.3	Condición de contaminación.....	41
4.4	Plataforma computacional utilizada	41
4.4.1	Modelado y simulación	41
4.5	Simulación de configuración inicial	42
4.5.1	Condición seca	43
4.5.2	Condición de lluvia	46
4.5.3	Condición de contaminación.....	48

4.6	Simulación aplicando barrido paramétrico	51
4.6.1	Condición seca	53
4.6.2	Condición de lluvia	57
4.6.3	Condición de contaminación	61
4.7	Resultados	62
4.7.1	Geometría mejorada	62
4.7.2	Información complementaria	64
CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		68
5.1	Análisis de resultados	68
5.1.1	Influencia de la metodología en dimensionamiento de anillos correctores sobre la limitación del máximo valor del campo eléctrico en aisladores poliméricos	68
5.1.2	Influencia de la metodología en dimensionamiento de anillos correctores sobre el alivio del punto crítico en aisladores poliméricos	69
5.1.3	Influencia de la metodología en dimensionamiento de anillos correctores sobre la selección de la mejor configuración de anillos correctores	69
CONCLUSIONES		71
RECOMENDACIONES		72
BIBLIOGRAFÍA		73
MATRIZ DE CONSISTENCIA		77
ANEXOS		78
ANEXO A.- Características técnicas		79
ANEXO B.- Pasos para modelamiento		82
ANEXO C.- Resultados del barrido paramétrico.....		95

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Estructura en 500 kV con anillos correctores de campo	2
Fig. 2.1 Conectividad nodal – (a) 6 elementos (hexagonal) y (b) 8 elementos (octogonal)..	8
Fig. 2.2 Estructura interna del aislador polimérico	9
Fig. 2.3 Relación entre permitividad, conductividad y resistividad de la capa contaminante	10
Fig. 2.4 Gotas de agua sobre aislador polimérico	11
Fig. 2.5 Línea 220 kV Talara-Zorritos L-2249 P-09, aislador se rompió después de 7 años de operación.	12
Fig. 2.6 Línea 220 kV Huancavelica- Independencia L-2203 T-486, aislador se rompió después de 11 años.	12
Fig. 2.7 Línea 220 kV Pomacocha-San Juan L-2205 T-555. Aislador con núcleo expuesto.....	13
Fig. 2.8 Línea 220 kV Chilca- Desierto L-2208 T-131. Aislador erosionado (heavy digging).	13
Fig. 2.9 Detección de descargas corona en Línea 220 kV L-2205 T-555 Pomacocha-San Juan.....	13
Fig. 2.10 Manifestación de descargas corona en S.E. 60kV Villa el Salvador	13
Fig. 2.11 Descargas corona alrededor de terminal metálico de aislador polimérico de LT 500 kV en servicio instalado, sin anillo corrector	14
Fig. 2.12 Anillo corrector (a) abierto y (b) cerrado	14
Fig. 2.13 Anillo anti corona sujeto al aislador polimérico	15
Fig. 2.14 Diferencia entre anillo de distribución de campo y anti corona.....	15
Fig. 2.15 Esquema detallado de las dimensiones del anillo	16
Fig. 2.16 Esquema simplificado de las dimensiones del anillo	17

Fig. 2.17 Influencia del anillo anti corona en el campo eléctrico (a 0.5 mm sobre superficie del aislador)	18
Fig. 2.18 Actividad de descargas corona en un aislador polimérico de 230 kV, con anillo anti corona instalado inadecuadamente, en subestación eléctrica	19
Fig. 2.19 Circuito eléctrico equivalente para un aislador polimérico contaminado	20
Fig. 2.20 Potencial ante variación de resistencia por contaminación ($C_t= 30\text{pF}$)	22
Fig. 2.21 Campo eléctrico ante variación de resistencia por contaminación ($C_t= 30\text{pF}$) ...	22
Fig. 2.22 Potencial ante variación de Capacitancia parásita a tierra ($R= 1.0\text{E}+09\Omega$)	22
Fig. 2.23 Campo eléctrico ante variación de Capacitancia parásita a tierra ($R= 1.0\text{E}+09\Omega$)	22
Fig. 3.1 Representación de una curva característica C_n	24
Fig. 3.2 Forma y ubicación para aplicación del método de elementos finitos en la aleta del aislador	25
Fig. 3.3 Elementos discretizados alrededor del nodo 3	26
Fig. 3.4 Valores de (a) Potencial en V y (b) Campo eléctrico en kV/cm, en nodos de la aleta del aislador	28
Fig. 3.5 Curva característica del campo eléctrico en borde de aleta	29
Fig. 3.6 Representación de curvas C_0 y C_n	31
Fig. 3.7 Flujograma 1 de la metodología propuesta para el establecimiento de modelos computacionales.	33
Fig. 3.8 Flujograma 2 de la metodología propuesta para la mejora de accesorios correctores de campo eléctrico	35
Fig. 4.1 Diagrama unifilar MAMO	37
Fig. 4.2 Estructura E588 de L-5033	38
Fig. 4.3 Dimensiones y localización inicial de los anillos	39
Fig. 4.4 Escenarios de análisis	40
Fig. 4.5 Entorno de simulación	41
Fig. 4.6 Distancias acumuladas a lo largo de la superficie del aislador	42
Fig. 4.7 (a) Potencial eléctrico y (b) Campo eléctrico sobre la superficie del aislador (I-CS)	43
Fig. 4.8 Campo eléctrico sobre superficie 3D en (a) Torre, (b) Lado AT, (c) Lado 0V (I-CS)	44

Fig. 4.9 (a) Potencial eléctrico y (b) Campo eléctrico sobre la superficie del aislador (II-CS)	44
Fig. 4.10 Campo eléctrico en $y=0$ de (a) Lado 0V y (b) Lado AT (II-CS)	45
Fig. 4.11 Campo eléctrico en Torre (II-CS)	45
Fig. 4.12 Campo eléctrico en lado (a) 0V y (b) AT (II-CS)	45
Fig. 4.13 Potencial eléctrico sobre aislador (I-CH)	46
Fig. 4.14 Campo eléctrico en (a) Lado AT y (b) Lado 0V (I-CH)	46
Fig. 4.15 Campo eléctrico sobre superficie de (a) Torre, (b) Lado AT, (c) Lado 0V (I-CH)	47
Fig. 4.16 Potencial eléctrico sobre aislador (II-CH)	47
Fig. 4.17 Campo eléctrico sobre aislador en Lado AT (II-CH)	48
Fig. 4.18 Campo eléctrico sobre aislador en Lado 0V (II-CH)	48
Fig. 4.19 Potencial eléctrico sobre capa contaminante (I-CC)	49
Fig. 4.20 Campo eléctrico sobre (a) capa contaminante y (b) goma de silicona (I-CC)	49
Fig. 4.21 Potencial eléctrico sobre (a) capa contaminante y (b) goma de silicona	50
Fig. 4.22 Campo eléctrico sobre (a) superficie de capa contaminante y (b) aislador	50
Fig. 4.23 Campo eléctrico en $y=0$, lado AT (II-CC)	50
Fig. 4.24 Campo eléctrico en $y=0$, lado 0V (II-CC)	51
Fig. 4.25 Parámetro X_p para cada combinación del barrido III-CS-A2	53
Fig. 4.26 Parámetro E_p para cada combinación del barrido III-CS-A2	53
Fig. 4.27 Indicadores k_l y k_p para cada combinación del barrido III-CS-A2 ($dr = -10$)	54
Fig. 4.28 Indicadores k_l y k_p para cada combinación del barrido III-CS-A2 ($dr = 0$)	54
Fig. 4.29 Indicadores k_l y k_p para cada combinación del barrido III-CS-A2 ($dr = 10$)	55
Fig. 4.30 Indicador k_c para cada combinación del barrido III-CS-A2	55
Fig. 4.31 Parámetro X_p para cada combinación del barrido III-CS-A3	56
Fig. 4.32 Parámetro E_p para cada combinación del barrido III-CS-A3	56
Fig. 4.33 Indicadores k_l y k_p para cada combinación del barrido III-CS-A3	56
Fig. 4.34 Indicador k_c para cada combinación del barrido III-CS-A3	57
Fig. 4.35 Parámetro X_p para cada combinación del barrido III-CH-A2	58
Fig. 4.36 Parámetro E_p para cada combinación del barrido III-CH-A2	58
Fig. 4.37 Indicadores k_l y k_p para cada combinación del barrido III-CH-A2	58
Fig. 4.38 Indicador k_c para cada combinación del barrido III-CH-A2	59
Fig. 4.39 Parámetro X_p para cada combinación del barrido III-CH-A3	59

Fig. 4.40	Parámetro E_p para cada combinación del barrido III-CH-A3.....	60
Fig. 4.41	Indicadores k_l y k_p para cada combinación del barrido III-CH-A3.....	60
Fig. 4.42	Indicador k_c para cada combinación del barrido III-CH-A3	60
Fig. 4.43	E sobre la capa de contaminante	61
Fig. 4.44	E sobre el material polimérico.....	61
Fig. 4.45	Curvas características de nuevas disposiciones sobre entorno inicial de condición seca	63
Fig. 4.46	Distribución del E con configuración de anillos (a) inicial, (b) de barrido en condición seca, (c) de barrido en condición de lluvia	63
Fig. 4.47	Distribución del E en punto crítico, con configuración de anillos (a) inicial, (b) de barrido en condición seca, (c) de barrido en condición de lluvia	64
Fig. 4.48	Identificación de aletas en aletas en perfiles de campo eléctrico.....	64
Fig. 4.49	Campo eléctrico sobre anillos, vistas (a) xy, (b) xz y (c) yz.....	65
Fig. 4.50	Campo eléctrico en condición seca con y sin anillos	66
Fig. 4.51	Aplicación de geometría mejorada en escenario contaminado – campo eléctrico sobre capa contaminada.....	66
Fig. 4.52	Aplicación de geometría mejorada en escenario contaminado – campo eléctrico sobre aislador	67

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 2.1 Enfoques para transformar la formulación física del problema en su análogo discreto de elementos finitos.....	8
TABLA N° 2.2 Umbral de aparición de descargas corona ante factores ambientales.....	16
TABLA N° 2.3 Dimensiones del anillo por nivel de tensión.....	17
TABLA N° 2.4 Valores de campo eléctrico máximo en cadenas con accesorios correctores	19
TABLA N° 2.5 Parámetros de prueba para el cálculo en aislador polimérico.....	21
TABLA N° 3.1 Parámetros característicos en curvas de campo eléctrico	24
TABLA N° 3.2 Permitividades para aplicación del método de elementos finitos en la aleta del aislador	25
TABLA N° 3.3 Coordenadas nodales para aplicación del método de elementos finitos en la aleta del aislador	25
TABLA N° 3.4 Variables, dimensiones e indicadores metodológicos	30
TABLA N° 3.5 Indicadores para el análisis de curvas características	31
TABLA N° 3.6 Factor de corrección para un conjunto de curvas características.....	32
TABLA N° 4.1 Propiedades de los materiales	39
TABLA N° 4.2 Valores de frontera iniciales	40
TABLA N° 4.3 Valores de los indicadores de la variable X.....	42
TABLA N° 4.4 Clasificación y codificación de grupos de resultados por simulación.....	43
TABLA N° 4.5 Parámetros I-CS.....	44
TABLA N° 4.6 Parámetros II-CS	46
TABLA N° 4.7 Parámetros I-CH	47
TABLA N° 4.8 Parámetros II-CH.....	48
TABLA N° 4.9 Parámetros en I-CC.....	49
TABLA N° 4.10 Parámetros en II-CC	51

TABLA N° 4.11 Codificación para las variaciones por barrido paramétrico	52
TABLA N° 4.12 Dimensiones y localización inicial de los anillos	52
TABLA N° 4.13 Grado de eficiencia de nuevas dimensiones sobre entorno inicial	62
TABLA N° 4.14 Disposición geométrica mejorada según metodología aplicada	62
TABLA N° 4.15 Comparación entre diámetros de L-5033, fabricante y resultados de simulación	65
TABLA N° 5.1 Eficiencia en la limitación del máximo valor del campo eléctrico	69
TABLA N° 5.2 Eficiencia en el alivio del punto crítico	69
TABLA N° 5.3 Eficiencia en la selección de anillos correctores	70

PRÓLOGO

En el presente trabajo de tesis, titulado “Diseño y aplicación de metodología en dimensionamiento de anillos correctores, reduciendo el estrés eléctrico en aisladores poliméricos”, se propone y desarrolla una metodología para el dimensionamiento de accesorios correctores de campo eléctrico, para reducir el estrés eléctrico en aisladores poliméricos de líneas de transmisión de alta tensión, ante diferentes condiciones climáticas.

El nivel de investigación es aplicado, el enfoque de la investigación es cuantitativo, el método de la investigación es deductivo.

Se define a la variable independiente “x” como “Metodología en dimensionamiento de anillos correctores”.

Por otro lado, se define la variable dependiente “y” como “Reducción del estrés eléctrico en aisladores poliméricos”.

Dentro de los alcances se tiene que el análisis se efectuará en estado estacionario, la metodología contempla distintos escenarios climáticos, se trabajará con aisladores tipo suspensión de material polimérico, el aislador usado en las simulaciones pertenece a una línea de transmisión de 500 kV existente.

Se muestran las ventajas del uso de herramientas computacionales en la solución del campo eléctrico en un entorno virtual, de donde se aprecia el amortiguamiento del estrés eléctrico en regiones cercanas a los aisladores poliméricos.

Se aplica la metodología para recopilar, interpretar, analizar y presentar los resultados. Finalmente, como resultado se obtienen los parámetros espacio - geométricos de los anillos más adecuados.

La tesis está dividida en 5 capítulos:

En el Capítulo I se describe el problema de los altos valores de campo eléctrico en aisladores poliméricos de líneas de transmisión de muy alta tensión. Así mismo, se indican los objetivos de la tesis y una revisión bibliográfica relacionada con el tema de este trabajo.

En el Capítulo II se presenta el marco teórico y conceptual donde se describen las principales características de los aisladores poliméricos y accesorios correctores de campo. También se describen

brevemente los conceptos de potencial y campo eléctrico. Adicionalmente se establece el procedimiento analítico para calcular la distribución del campo eléctrico sobre aisladores poliméricos.

En el Capítulo III se describe la metodología propuesta; se introducen conceptos inéditos para aplicación de la metodología, se presentan los pasos para cálculo analítico y computacional del campo eléctrico, se define la técnica de barrido paramétrico, se presentan indicadores y criterios de selección, se presentan las variables e indicadores metodológicos, y finalmente se presenta el flujograma de la metodología propuesta.

En el Capítulo IV se presenta la aplicación de la metodología propuesta; se establecen datos de entrada, se definen los escenarios de análisis, se describe brevemente la plataforma computacional utilizada, se presentan las simulaciones a los escenarios con configuración geométrica inicial, se presentan las simulaciones a los escenarios con configuración geométrica modificada, y finalmente se presentan los resultados obtenidos.

En el Capítulo V se presenta el análisis y la discusión de los resultados, según los objetivos específicos establecidos.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

El incremento de la demanda de energía eléctrica a nivel mundial ha llevado al uso de sistemas de muy alta tensión para el transporte de la energía eléctrica. Por ejemplo, países como Estados Unidos, Japón y Rusia tienen líneas de transmisión operando por encima de 750 kV desde hace muchos años (Lings et al., 2005). En el caso del Perú, desde el año 2011, ya cuenta con líneas de transmisión en 500 kV como, por ejemplo, la línea L-5001 S.E Chilca - S.E Carabayllo (Osinergmin, 2020).

En las líneas de muy alta tensión, los aisladores están sujetos a una mayor exigencia de sostenimiento de tensión. Esto se debe a los altos valores de campo eléctrico que deforman la repartición de la tensión a lo largo de los aisladores. Esta mayor exigencia puede ocasionar la ineficiencia del desempeño de dichos componentes en régimen estacionario. Además, ante condiciones de lluvia o contaminación se incrementa el riesgo de falla.

Generalmente, a fin de mitigar las altas sollicitaciones de tensión en los aisladores, accesorios correctores de campo eléctrico son empleados. Estos accesorios presentan distintas formas geométricas como, por ejemplo, lazos, raquetas y anillos. Son generalmente usados en el extremo inferior cercano al conductor de líneas de transmisión de 220 kV. Su uso también es recomendado en líneas de transmisión de 500 kV agregando otro corrector en el extremo superior próximo al punto de sujeción (Niedospial, 2012). La Fig. 1.1 muestra una estructura con anillos correctores de campo de una línea de 500 kV.

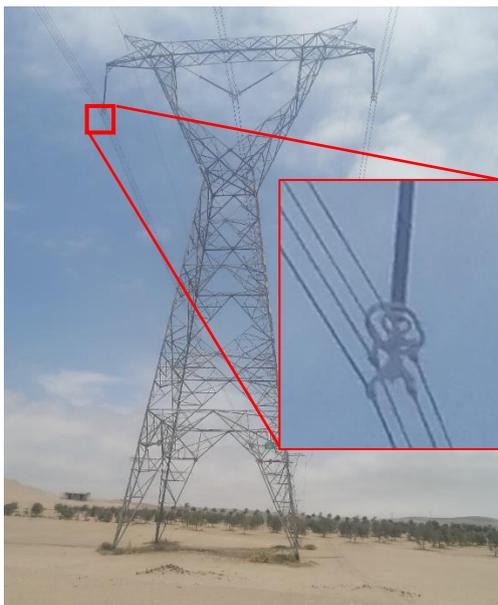


Fig. 1.1 Estructura en 500 kV con anillos correctores de campo
(Fuente: Elaboración propia)

1.2 Descripción del problema de investigación

A nivel mundial países como Japón, India, China, Canadá, Estados Unidos utilizan líneas en 500 kV y tensiones superiores (T. Doshi et al., 2011), en las cuales presentan problemas por elevados gradientes de potencial en aisladores. Por ejemplo, en Palo Alto (EEUU) se detectaron descargas corona en aisladores poliméricos de 230 kV (A. Phillips et al., 2008), mientras que en China, India y Rusia ((El-Refaie et al., 2016; Lings et al., 2005; Zhang et al., 2019)) se han reportado problema similares. A nivel de Sudamérica, Brasil utiliza líneas de transmisión en 138 kV, 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV, 750 kV y 600 kV (DC) (Ruchansky, 2013), en las que se han producido fallas en aisladores poliméricos por altos gradientes de potencial (Nallim et al., 2003).

Actualmente, el Perú cuenta con líneas eléctricas de alta tensión en 138kV como Intipampa – Moquegua (L-1384A) y en 220kV como Chilca - Desierto (L-2208). Así como también líneas de muy alta tensión, como las líneas en 500 kV de la interconexión Mantaro – Marcona – Socabaya – Montalvo (MAMO).

Entre el 2004 y 2009, la empresa concesionaria Red de Energía del Perú S.A (REP) (Loardo & Energía, 2010). reportó 13 fallas en los aisladores poliméricos de sus líneas de transmisión. La causa de esas fallas fueron los elevados gradientes de potencial ubicados en el tramo del extremo de conexión al conductor de alta tensión. De estas fallas, el 92% ocurrieron en líneas que recorren la costa peruana (Loardo & Energía, 2010). El reporte señala que entre las principales causas de este problema están:

- Una mala selección del aislador.
- Defectos en el proceso de fabricación.

- Elevados niveles de contaminación

Otra causa de falla puede ser el uso inadecuado de accesorios de corrección de campo eléctrico.

Por ello, el problema general puede sintetizarse en la siguiente cuestión: ¿De qué manera el diseño y aplicación de una metodología en dimensionamiento de anillos correctores permite limitar el máximo valor del campo eléctrico, aliviar el punto crítico y seleccionar la mejor configuración de anillos correctores, en aisladores poliméricos?

1.3 Antecedentes investigativos

De la revisión bibliográfica efectuada para la elaboración de la presente tesis, los trabajos más resaltantes se resumen a continuación:

- En particular (T. Doshi et al., 2011) presenta el cálculo del campo eléctrico para aisladores poliméricos hasta 1200 kV usando el método de elementos de frontera. Considera la presencia de accesorios correctores, así como también diferentes escenarios climáticos. Además, se involucra en la optimización de los anillos variando sus dimensiones geométricas.
- Por otro lado (A. Phillips et al., 2008) realiza una revisión general del análisis del campo eléctrico sobre aisladores poliméricos, destaca por definir valores críticos de gradiente para diferentes zonas del aislador, además recolecta del EPRI los valores máximos de campo eléctrico para distintos niveles de tensión con y sin accesorios correctores.
- De forma similar (Zhang et al., 2019) realiza un análisis para obtener la curva de campo eléctrico para los aisladores de cada fase de una torre 110 kV, además añade un coeficiente de desigualdad para clasificar cada curva obtenida. Finalmente muestra las tensiones disruptivas de pruebas de arco eléctrico realizadas en laboratorio y evalúa la influencia del coeficiente de desigualdad.
- Como aplicación (El-Refaie et al., 2016) establece varios modelos de perfiles de aisladores en 11kV y, considerando un escenario de contaminación continua y otro con gotas de agua, los optimiza aplicando *particle swarm optimization*, combinando Matlab y Comsol.
- Pongamos por caso el trabajo de (Al Dhalaan & Elhirbawy, 2003b) donde se muestra tres métodos para hallar la distribución del potencial en una cadena de aisladores de naturaleza discreta (aisladores tipo campana).
- Por otro lado, el autor en (Yanque Montufar, 1972) presenta un método novedoso para hallar la distribución de potencial en cadenas de aisladores discretas, pero además muestra el camino a seguir para encontrar las corrientes de fuga capacitivas en aisladores, y destaca por demostrar su carácter no lineal.
- Además, en (Yanque Montufar, 2020) se presenta un manual práctico para la aplicación de la técnica de perfilado, además sintetiza los pasos necesarios para la obtención de la distribución de potenciales y las corrientes de fuga localizadas en cualquier aislador de la cadena.

- De forma similar el autor en (Al Dhalaan & Elhirbawy, 2003a) muestra un modelo para hallar la distribución del potencial en cadenas de aisladores discretos pero considerando solo el carácter resistivo de la contaminación.
- En particular el autor en (Arshad et al., 2015) muestra el efecto del nivel de contaminación sobre la distribución del campo eléctrico sobre un aislador polimérico de 11kV. Además, identifica en su curva de campo eléctrico que los máximos y mínimos relativos pertenecen a las bases y puntas de las aletas respectivamente.
- Por otra parte el autor en (Nicolopoulou et al., 2011) analiza de campo eléctrico sobre los aisladores en DC y AC. Aplica una capa contaminante y variando sus valores de conductividad concluye que, bajo un análisis AC, el incremento de contaminante ocasiona un aumento en la intensidad del campo eléctrico.
- Con un enfoque más práctico el autor en (Niedospial, 2012) describe las características más relevantes de los accesorios correctores de campo; recomienda un transporte cuidadoso a fin de evitar daños; presenta dimensiones geométricas usuales para 230kV, 345kV y 500 kV; finalmente resalta la importancia del uso adecuado de estos accesorios, ya que mejoraran el rendimiento del aislador polimérico a largo plazo.
- Cabe resaltar que para el modelo de la presente tesis se tomaron los valores de permitividad y conductividad del autor en (Kalimurugan & Maheswari, 2015). Además, este realiza simulaciones para hallar la distribución del campo eléctrico sobre un aislador polimérico de 230 kV, incluyendo la presencia de un accesorio corrector hecho de acero y otro de aluminio, también realiza un barrido de los parámetros radio mayor y menor del anillo.
- De forma similar el autor en (Murawwi et al., 2013) realiza simulaciones de campo eléctrico sobre un aislador, variando los parámetros R y r del anillo. Después grafica los resultados obtenidos usando la herramienta *surface fit* de MATLAB, de donde halla los coeficientes de una ecuación que represente de forma aproximada el campo eléctrico. Finalmente, habiendo encontrado los coeficientes que se adecuan a su modelo, realiza una optimización no lineal estableciendo una función objetivo basada en la geometría del anillo y ciertas restricciones, manteniendo constante la distancia del anillo hacia alta tensión.
- Para complementar, un análisis especializado presentado en (Barros et al., 2017) muestra un nuevo enfoque para la optimización de accesorios correctores, valiéndose de los métodos *Nelder-Mead*, *Bound optimization by quadratic approximation (BOBYQA)* y *Constrained optimization by linear approximation (COBYLA)* consigue la optimización del anillo en un aislador polimérico de 230 kV, logrando reducir hasta en 80% el máximo valor del campo eléctrico.
- Haciendo énfasis la importancia del uso de anillos, el autor en (Murawwi & El-Hag, 2011) diseña y simula accesorios correctores para aisladores no cerámicos de 400 kV, tanto para el lado AT como para el lado 0V, además analiza el efecto de la aplicación de anillos dobles en el lado AT.

- Mediante simulaciones, el autor en (Hassanvand et al., 2014) logra obtener la distribución del campo eléctrico para una cadena de aisladores tipo campana 132 kV, además efectúa un barrido paramétrico para el radio r interior del anillo y la posición H del anillo. Concluye que el parámetro r tiene mayor influencia en la reducción del campo eléctrico.
- Usando un algoritmo basado en *particle swarm optimization* con población dinámica, el autor en (M^oHamdi et al., 2016) obtiene los parámetros geométricos óptimos para el accesorio corrector de un aislador polimérico de 230 kV.
- De manera similar el autor en (Xu & Zhu, 2011) desarrolla y ejecuta un modelo de redes neuronales para la optimización de los parámetros geométricos de los accesorios correctores de campo eléctrico en un aislador polimérico en 330 kV.

En síntesis, los trabajos mencionados analizan el campo eléctrico considerando el tipo de aislador, la distribución geométrica de conductores, el número de conductores por fase, niveles de tensión, condiciones climáticas y optimización de los accesorios de corrección. Además, se muestra la diferencia entre un análisis AC y DC.

Algunos autores centran sus esfuerzos en mostrar la aplicación de accesorios correctores y como la variación de la posición de estos afecta la distribución del campo eléctrico. De esta manera, valiéndose del uso de técnicas de optimización minimizando una función objetivo, encuentran los valores más adecuados para reducir el estrés eléctrico en la región cercana al lado de alta tensión.

1.4 Objetivos del estudio

1.4.1 Objetivo general

Establecer en qué medida el diseño y aplicación de una metodología en dimensionamiento de anillos correctores consigue limitar el máximo valor del campo eléctrico, aliviar el punto crítico y seleccionar la mejor configuración de anillos correctores, en aisladores poliméricos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Estudiar de qué manera el diseño y aplicación de una metodología en dimensionamiento de anillos correctores influye en la limitación del máximo valor del campo eléctrico en aisladores poliméricos.
- Establecer de qué manera con el diseño y aplicación de una metodología de dimensionamiento de anillos correctores se logra aliviar el punto crítico en aisladores poliméricos.
- Analizar de qué manera con el diseño y aplicación de una metodología de dimensionamiento de anillos correctores se alcanza la selección de la mejor configuración de anillos correctores en aisladores poliméricos.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis generales

El diseño y aplicación de una metodología en dimensionamiento de anillos correctores logra limitar el máximo valor del campo eléctrico, aliviar el punto crítico y seleccionar la mejor configuración de anillos correctores, en aisladores poliméricos.

1.5.2 Hipótesis específicas

- El diseño y aplicación de una metodología en dimensionamiento de anillos correctores logra limitar el máximo valor del campo eléctrico en aisladores poliméricos.
- El diseño y aplicación de una metodología de dimensionamiento de anillos correctores consigue aliviar el punto crítico en aisladores poliméricos.
- El diseño y aplicación de una metodología de dimensionamiento de anillos correctores logra seleccionar la mejor configuración de anillos correctores en aisladores poliméricos.

1.6 Alcances

- El aislador analizado es de material polimérico, cadena simple, instalada en suspensión.
- Se consideran constantes los parámetros físicos (permitividad y conductividad) de los materiales que conforman el aislador y las regiones cercanas.
- Se considera la influencia de la estructura, del suelo, del cable de guarda y de los conductores en haz (4 conductores).
- La estructura modelo es la N° 588 de la L.T 500 kV Poroma Yarabamba, la cual es simple terna y tiene dos cables de guarda. Sin embargo, en el análisis solo se considera la influencia de una fase y el cable de guarda más próximo.
- Se incluye la influencia de gotas de lluvia sobre el dieléctrico, y una capa muy fina de contaminación.
- El análisis se efectuará en estado estacionario.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Marco teórico

En este apartado se describen algunos aspectos introductorios respecto al problema de la medición del campo eléctrico en aisladores poliméricos y la necesidad del uso de herramientas computacionales; luego se presenta un breve resumen del método de elementos finitos; después se describe al aislador polimérico, se presentan sus características, su desempeño bajo ciertas condiciones, se presentan las causas de falla y una breve descripción del fenómeno de descargas corona sobre su superficie; finalmente se describen los accesorios correctores de campo eléctrico, su influencia sobre el desempeño del aislador y su impacto en la reducción del estrés eléctrico.

2.1.1 La medición del campo eléctrico en aisladores poliméricos

Dentro del laboratorio, la medición del potencial eléctrico sobre la superficie de un aislador es posible con el uso de una pértiga; la medición del campo eléctrico requiere equipo especializado; y la medición en el interior es imposible. Conocer la distribución del campo eléctrico sobre el aislador es importante para localizar los puntos donde el aislador sufrirá un mayor estrés eléctrico.

La distribución del potencial puede ser obtenida usando la técnica del perfilado (Yanque Montufar, 2020). Esta técnica consiste en medir la tensión respecto a tierra sobre la caperuza de cada aislador de una cadena de aisladores. La técnica puede ser usada para aisladores poliméricos, sin embargo, se obtendrían resultados imprecisos, debido a la deformación del campo eléctrico a causa de la propia pértiga, y porque no se podrían obtener los valores en toda la superficie, por ser de naturaleza continúa.

En caso de analizar el campo eléctrico en aisladores energizados, sería costosa su medición directa, y sería inviable retirar el aislador para realizarle pruebas en laboratorio.

Por esta razón, la literatura especializada modela y analiza el campo eléctrico del equipamiento usando herramientas computacionales (Zhang et al., 2019),(Uckol et al., 2020).

2.1.2 Introducción al método de elementos finitos

En el método de elementos finitos (MEF), la región de interés es discretizada en pequeños elementos. Para una región dividida en N elementos, donde la energía total se reparte entre ellos, la energía potencial viene dada por la ecuación (2.1)

$$U_{total} = \sum_{e=1}^N U(e) \quad (2.1)$$

Para minimizar la energía potencial total U , $U(e)$ debe ser mínima para cada elemento. Si se considera la discretización triangular mostrada en la Fig. 2.1, entonces un nodo en particular se conecta a otros seis nodos en conectividad hexagonal, o a otros ocho nodos en conectividad octagonal.

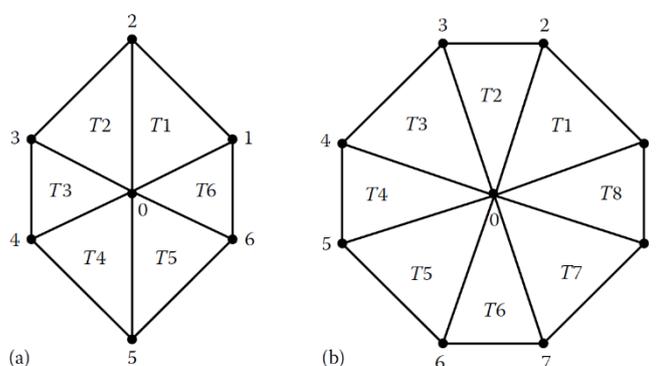


Fig. 2.1 Conectividad nodal – (a) 6 elementos (hexagonal) y (b) 8 elementos (octogonal)
Fuente: (Chrakravorti, 2015)

La aplicación de un grupo de ecuaciones y funciones detalladas a cada nodo con potencial desconocido generará un sistema compatible determinado de ecuaciones lineales. La resolución de ese sistema de ecuaciones permite obtener los potenciales de los nodos. Los elementos podrán tener tamaños diferentes ya que dependen de las coordenadas nodales. Las expresiones de las ecuaciones mencionadas anteriormente pueden ser consultadas en (Chrakravorti, 2015, p. 325).

Durante la determinación del campo eléctrico en alta tensión, se aplica el enfoque variacional (Chrakravorti, 2015, p. 327) del método de elementos finitos, que se describe en la TABLA N° 2.1.

TABLA N° 2.1 Enfoques para transformar la formulación física del problema en su análogo discreto de elementos finitos.
(Fuente: Elaboración propia)

Enfoque	Característica
Por método de Galerkin	La formulación física se expresa con ecuaciones diferenciales de Poisson o Laplace conocidas.
Variacional	La formulación física se expresa como la minimización de una funcional, que representa la energía almacenada en el campo eléctrico.
Residuos ponderados	La formulación física solo necesita las ecuaciones iniciales que gobiernan el problema, no se requiere un enunciado variacional ni una funcional.

Diversos programas de computadora basan su funcionamiento en este método, por ejemplo: Ansys Maxwell, Comsol Multiphysics, OpenFoam, etc.

2.1.3 Aisladores poliméricos

a) Características de los aisladores poliméricos

Este tipo de aisladores son muy usados por tener características únicas, son resistentes a esfuerzos mecánicos, resistentes entornos de elevada contaminación, son livianos y poseen superficie hidrófoba. Su interior está compuesto por un núcleo de fibra de vidrio (FRP: *Fibre reinforced plastic*) envuelto con goma de silicona (*Silicone rubber*) formando aletas. como se muestra en la Fig. 2.2.

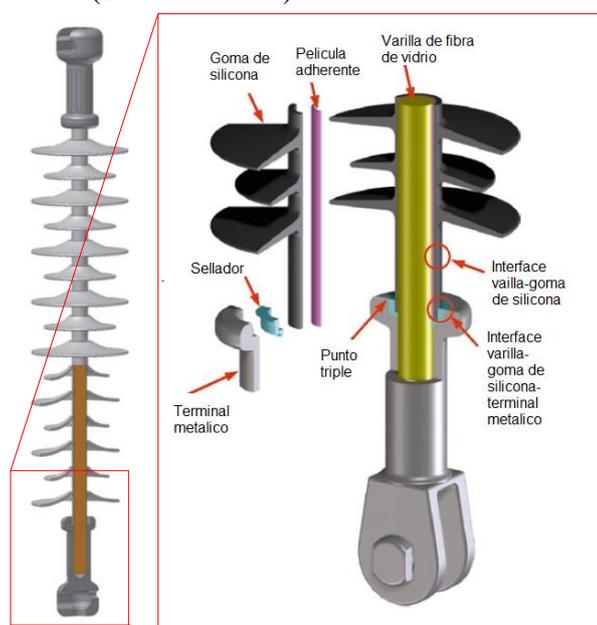


Fig. 2.2 Estructura interna del aislador polimérico
Fuente: (CIGRE, 2017, p. 750)

En los extremos se fijan terminales metálicos para asegurar que el interior permanezca aislado del exterior. Es importante señalar que una de las zonas más expuestas al intenso campo eléctrico es el punto crítico (o punto triple); que es el punto de unión entre la goma de silicona, el terminal metálico y el aire; el cual se encuentra al muy cerca de la región de alta tensión.

El aislador polimérico se caracteriza por tener alta rigidez dieléctrica, baja conductividad y alta permitividad.

b) Condiciones climáticas en el desempeño eléctrico del aislador

El desempeño eléctrico del aislador está relacionado con el tipo de material, tiempo instalado, lugar de instalación, factores climáticos y la distribución superficial del campo eléctrico. Para comprender y mejorar su desempeño, es necesario ejecutar un análisis del campo eléctrico. Pueden producirse descargas parciales sobre su superficie, en los terminales o en el interior de la varilla de fibra de vidrio. La contaminación puede incrementar el estrés eléctrico. Las descargas corona dañan más a

los aisladores poliméricos que a los de porcelana (Looms & Chapman, 1991).

❖ Influencia de la contaminación

Una capa de contaminación es desfavorable para el aislador al humedecerse (por condensación, niebla o precipitación). La conductividad y permitividad de una capa de contaminación, por ser de naturaleza resistivo-capacitiva, guardan cierta relación. La Fig. 2.3 muestra esta correspondencia tomando en cuenta las ideas de (Mukherjee et al., 1999)(Lopes & Becerra, 2015).

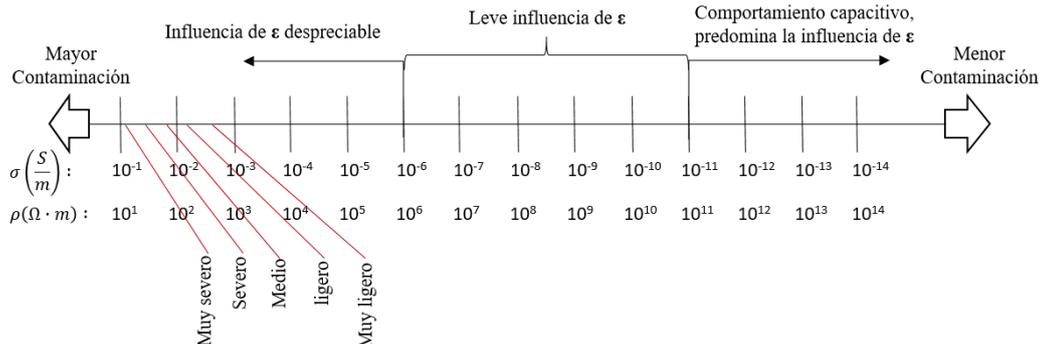


Fig. 2.3 Relación entre permitividad, conductividad y resistividad de la capa contaminante (Fuente: Elaboración propia)

De acuerdo con (El-Refaie et al., 2016), a medida que se incrementa el espesor de la capa de contaminación, la intensidad del campo eléctrico también aumenta. Lo mismo ocurre al incrementar la conductividad de la capa contaminante (Mayor contaminación).

Según el Anexo E del estándar IEC 61815-1 (IEC, 2020), los valores de conductividad para el nivel de contaminación devienen de una mezcla de depósitos no solubles y agua desmineralizada, por lo tanto, los valores de conductividad corresponden a contaminación con presencia de humedad.

❖ Influencia de la lluvia (gotas de agua)

En un entorno lluvioso o con niebla se forman gotitas de agua sobre la superficie del aislador (Ver Fig. 2.4), en lugar de una fina película de agua. Esto le otorga alta resistencia al paso de la corriente, lo que reduce la probabilidad de contorno. Sin embargo, esta hidrofobicidad podría perderse en ambientes de alta contaminación.

Al aplicarse un elevado campo eléctrico, las gotas de agua se alargarán sobre la superficie. Estas distorsiones acortan la distancia de aislamiento y provocan descargas superficiales.



Fig. 2.4 Gotas de agua sobre aislador polimérico
Fuente: (Tanushri Doshi, 2010, p. 10)

El ángulo de contacto se define por la clase de humectabilidad (WC). La norma IEC 62073:2003 (International Electrotechnical Commission, 2017) detalla acerca de la humectabilidad de las gotas de agua en los aisladores.

c) Causas de falla en aisladores

Una de las causas de falla en aisladores son las descargas del efecto corona. Estas descargas aparecen cuando el campo eléctrico excede el límite máximo de 1.5 kV/mm o 15 kV/cm. Bajo condiciones de gotas de lluvia o contaminación no uniforme el límite se reduce. Depende del tipo de tensión aplicada (AC o DC). La rugosidad y bordes afilados son regiones de aparición de descargas corona focalizada. El continuo bombardeo de iones es capaz de causar daños mecánicos al aislador, causando un envejecimiento prematuro. Se generan elementos químicos como hidróxidos de nitrógeno y ácido nítrico, formando una solución ácida, la cual causa corrosión sobre la superficie aislador.

Esta última causa está directamente ligada al máximo valor que alcanza el campo eléctrico en la superficie del aislador. El autor en (Loardo & Energía, 2010) menciona que entre 2004 y 2009 se reportó la aparición de 13 fallas mecánico – eléctricas en aisladores (anclaje) poliméricos 138kV y 220 kV (ver Fig. 2.5 y Fig. 2.6) instalados en la costa peruana entre 1998 y 2000, el 69% a 25 km del mar y el 23% a 50 km del mar. El causante fue la alta contaminación de la zona y la generación de ácido nítrico en la superficie de goma de silicona del aislador, producto de la presencia de descargas corona por alto estrés eléctrico. El ácido nítrico corroe al aislador hasta llegar al núcleo de fibra de vidrio, y la falla mecánica ocurre.



Fig. 2.5 Línea 220 kV Talara-Zorritos L-2249 P-09, aislador se rompió después de 7 años de operación.
Fuente: (Loardo & Energía, 2010)



Fig. 2.6 Línea 220 kV Huancavelica-Independencia L-2203 T-486, aislador se rompió después de 11 años.
Fuente: (Loardo & Energía, 2010)

En consecuencia, se realizaron inspecciones periódicas de limpieza y monitoreo, encontrándose más de cien aisladores deteriorados que presentaban partes con erosión, carbonización y exposición de núcleo (Fig. 2.7) entre otros. Luego de una evaluación se encontró lo siguiente:

- Los aisladores fallados presentaron erosión (Fig. 2.8 *heavy digging*) en la goma silicona que protege al núcleo de fibra de vidrio. El deterioro de la capa de silicona (*silicon rubber*) se produjo por la alta concentración de campo eléctrico en los aisladores.
- En la zona de falla de los aisladores se encontró presencia de ácido nítrico, que fue ocasionado por el fenómeno de corona, este ácido causó daños progresivos en el núcleo de fibra de vidrio hasta su rotura.
- Las roturas de los aisladores poliméricos se produjeron por el denominado fractura frágil (*brittle fracture*) ocasionada por la acción del ácido nítrico sobre el núcleo de fibra de vidrio.
- Los aisladores fallados que fueron fabricados con goma silicona tipo LSR (*liquid silicone rubber*) presentaron problemas de adherencia entre la goma silicona y el núcleo de fibra de vidrio del aislador.
- De los aisladores instalados en líneas costeras se encontraron altos niveles de contaminación soluble y no soluble en los aisladores fallados.



Fig. 2.7 Línea 220 kV Pomacocha-San Juan L-2205 T-555. Aislador con núcleo expuesto.
Fuente: (Loardo & Energía, 2010)



Fig. 2.8 Línea 220 kV Chilca- Desierto L-2208 T-131. Aislador erosionado (heavy digging).
Fuente: (Loardo & Energía, 2010)

d) Descargas corona en aisladores

Las descargas corona son un tipo de descarga parcial (DP) que tiene lugar generalmente en protuberancias. Es un fenómeno de carácter eléctrico que aparece si la tensión del campo eléctrico dentro de un sistema de aislamiento eléctrico excede un valor crítico (15 kV/cm en aire seco y sin contaminación).

Las descargas corona deterioran al aislador, sobre todo en el punto crítico (T. Doshi et al., 2011). Suelen presentarse en la región del aislador más cercana a la alta tensión. Las irregularidades en las superficies, los contaminantes, las gotas de agua y la nieve propician su aparición. Su manifestación es frecuente en líneas de transmisión y subestaciones eléctricas de 220 kV y 500 kV. No obstante, cuando los niveles de contaminación son muy elevados, pueden aparecer incluso en líneas de 60 kV. Las Fig. 2.9, Fig. 2.10 y Fig. 2.11 muestran la detección de descargas corona en Líneas de 220 kV, 60 kV y 500 kV, respectivamente.



Fig. 2.9 Detección de descargas corona en Línea 220 kV L-2205 T-555 Pomacocha-San Juan
Fuente: (Loardo & Energía, 2010)



Fig. 2.10 Manifestación de descargas corona en S.E. 60kV Villa el Salvador
Fuente: (Loardo & Energía, 2010)



Fig. 2.11 Descargas corona alrededor de terminal metálico de aislador polimérico de LT 500 kV en servicio instalado, sin anillo corrector

Fuente: (A. Phillips et al., 2008, p. 825)

2.1.4 Accesorios correctores de campo eléctrico

Los accesorios correctores forman parte de la ferretería de ensamblaje de los aisladores. Se usan para la corrección de campo eléctrico en aisladores de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. Los accesorios correctores de campo son elementos simples, delgados, hechos de aluminio, tienen la forma de toroide hueco (anillos). Por su forma, pueden ser del tipo abierto o cerrado, como se muestra en la Fig. 2.12. Los anillos del tipo abierto ayudan a descargar las altas corrientes hacia la estructura en caso de sobretensiones y contorneo (Papailiou & Schmuck, 2013, p. 345).



Fig. 2.12 Anillo corrector (a) abierto y (b) cerrado
Fuente: (Niedospial, 2012)

Por su función, los anillos correctores pueden clasificarse en 2 tipos, anillo anti corona (*Corona ring*) y anillo de distribución de campo (*Voltage equalizing ring*).

a) El anillo anti corona

Es un toroide pequeño que se conecta a la fase viva y se ubica a una altura entre 10 y 15 cm (ver Fig. 2.13). Normalmente los fabricantes lo suministran como parte del ensamble (Niedospial, 2012) y se recomienda su uso cerca a la fase viva a partir de 230 kV, y también cerca al terminal a tierra para tensiones de 345 kV en adelante (T. Doshi et al., 2011). Este anillo se usa para evitar el inicio de descargas corona, en especial cerca al punto crítico.



Fig. 2.13 Anillo anti corona sujeto al aislador polimérico
Fuente: (Niedospial, 2012)

b) El anillo de distribución de campo

El anillo de distribución de campo es parecido al anillo anti corona, pero se diferencia en su tamaño, función y localización (ver Fig. 2.14). Es más grande, se ubica más lejos de la fase viva y sirve para amortiguar el valor del campo eléctrico \vec{E} a lo largo de todo el aislador (o conjunto de aisladores) (Niedospial, 2012).

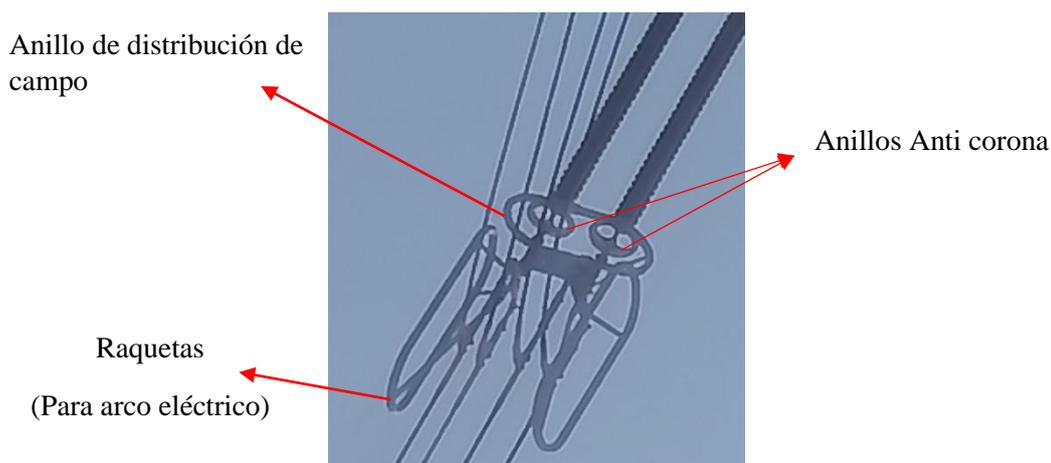


Fig. 2.14 Diferencia entre anillo de distribución de campo y anti corona
(Fuente: Elaboración propia)

c) Importancia

Su función principal es la de evitar o en lo posible reducir los efectos negativos de las descargas corona, debe graduar o dispersar el gradiente del campo eléctrico, manteniéndolo controlado por debajo de los niveles mostrados en la TABLA N° 2.2 (Papailiou & Schmuck, 2013, p. 329), sobre todo cerca de la fase viva y el punto crítico del aislador.

TABLA N° 2.2 Umbral de aparición de descargas corona ante factores ambientales
Fuente: (Papailiou & Schmuck, 2013, p. 329)

Ambiente	Presencia de contaminación	Ubicación	Umbral de aparición de corona (kV/cm)
Seco	NO	Anillos, terminal AT	17 - 21
Lluvia	SI	Superficie polimérica	4.5
Lluvia	SI	Punto crítico (Punto triple)	3.5
Seco	SI	Interior del aislador (entre varilla de fibra de vidrio y goma de silicona)	30

d) Geometría

De acuerdo con (T. Doshi et al., 2011; Guan et al., 2005; Murawwi et al., 2013; A. Phillips et al., 2008) , la localización del anillo y sus dimensiones influyen significativamente en la curva característica del gradiente, según (Papailiou & Schmuck, 2013, p. 318) las características geométricas para un diseño completo son las que se muestran en las Fig. 2.15.

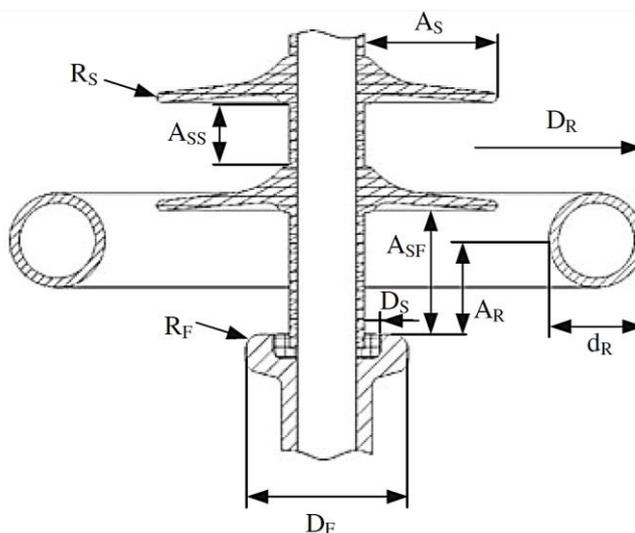


Fig. 2.15 Esquema detallado de las dimensiones del anillo
Fuente: (Papailiou & Schmuck, 2013, p. 318)

- A_R = Distancia entre anillo y terminal AT
- A_S = Longitud de aleta sobresaliente
- A_{SF} = Distancia entre terminal AT y aleta más cercana
- A_{SS} = Distancia entre aletas
- D_F = Diámetro de terminal AT
- D_R = Diámetro exterior de anillo
- D_S = Diámetro de junta
- d_R = Diámetro interior del anillo

- R_F =Radio del borde del terminal AT
- R_S =Radio del borde de aleta

Para un diseño más general, se puede prescindir de algunos de estos parámetros geométricos. Para el presente trabajo se utilizan los mostrados en la Fig. 2.16:

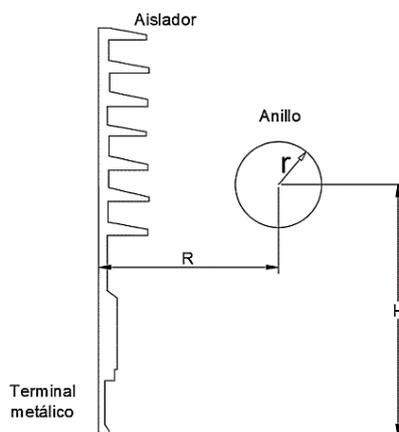


Fig. 2.16 Esquema simplificado de las dimensiones del anillo
(Fuente: Elaboración propia)

- R: Radio de la circunferencia directriz (Radio mayor)
- r: Radio del círculo generador (Radio menor)
- H: Altura desde el terminal metálico hasta el centro del anillo de distribución de campo

Algunos fabricantes, por ejemplo, *McLean Power Systems* (MacLean Power Systems, 2020, p. 108), recomiendan las dimensiones de la TABLA N° 2.3 para sus anillos.

TABLA N° 2.3 Dimensiones del anillo por nivel de tensión
Fuente: (Niedospial, 2012); (MacLean Power Systems, 2020, p. 108)

Dimensiones comunes de anillos correctores por nivel de tensión						
	$\leq 230 \text{ kV}$		345 kV		500 kV	
Posición terminal	Fase	Tierra	Fase	Tierra	Fase	Tierra
Diámetro	8-10''	-	11-13''	*8''	15-17''	8-10''

e) Criterios de diseño

La geometría del anillo, su forma, tamaño y localización no está estandarizado. Las dimensiones de estos anillos los realizan los fabricantes y se basan en diversas publicaciones, CIGRE (CIGRE, 2005) y el IEC (CEI/IEC, 1997), además de su experiencia.

- El tamaño del anillo es proporcional a la tensión. A mayor tensión, más grande debe ser el anillo de distribución de campo para reducir de manera efectiva el campo eléctrico.
- Si el anillo es demasiado pequeño para una aplicación o tensión específica, es posible que no

proporcione la protección deseada.

- Por el contrario, el anillo podría ser demasiado grande y no proporcionar la protección prevista.
- Usar un programa de modelamiento de campos eléctricos es un modo de determinar qué tamaño y forma de anillo se requiere para una aplicación específica, además si se necesitan en uno o ambos en los extremos del aislador.

f) Los anillos como reductores de gradiente de potencial

La localización y dimensiones de los anillos influyen en la distribución del campo eléctrico. Los fabricantes las definen bajos sus propios criterios y para esto realizan simulaciones usando programas especializados. Los valores de máximo campo eléctrico que obtienen oscilan entre 1 kV/cm y 8.5 kV/cm, como lo muestra la TABLA N° 2.4.

La Fig. 2.17 muestra un ejemplo del perfil de campo eléctrico de un aislador polimérico con y sin un anillo anti corona instalado. Los anillos anti corona no se aplican en todos los casos, la TABLA N° 2.3 indica recomendaciones genéricas para la aplicación del anillo.

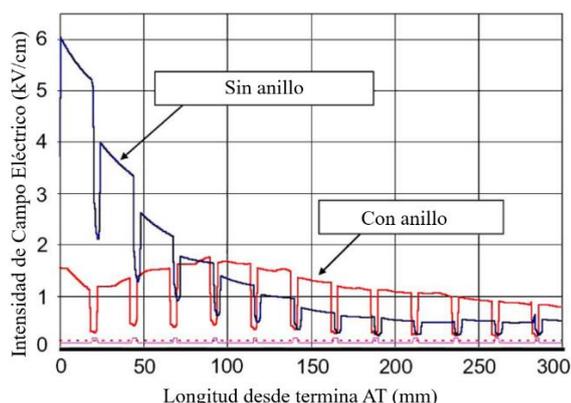


Fig. 2.17 Influencia del anillo anti corona en el campo eléctrico (a 0.5 mm sobre superficie del aislador)

Fuente: (A. Phillips et al., 2008, p. 826)

Adicionalmente, es inusual que los clientes ejecuten este tipo de simulaciones a fin de evaluar el nivel de reducción del estrés eléctrico en el anillo a seleccionar. Los anillos anti corona generalmente se diseñan y prueban para aplicaciones de líneas de transmisión estandarizadas. Si se aplican en aisladores poliméricos de líneas de transmisión no estandarizadas (por ejemplo, en subestaciones o líneas eléctricas con características especiales), las recomendaciones genéricas podrían no ser suficientes; siendo el modelado una medida de verificación necesaria.

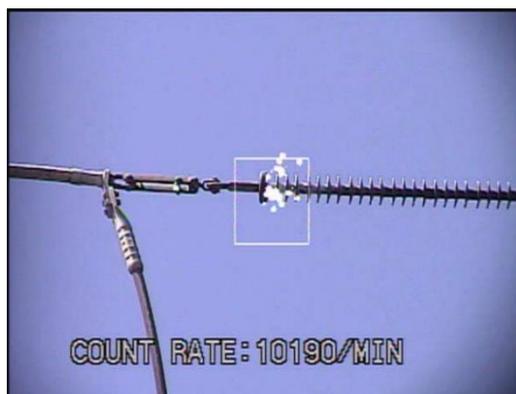


Fig. 2.18 Actividad de descargas corona en un aislador polimérico de 230 kV, con anillo anti corona instalado inadecuadamente, en subestación eléctrica
Fuente: (A. Phillips et al., 2008, p. 827)

En cuanto a las bondades del uso de accesorios correctores, en la TABLA N° 2.4 se presentan los máximos valores de campo eléctrico con y sin anillo. Nótese la reducción del valor del campo eléctrico máximo, al aplicarse los anillos.

TABLA N° 2.4 Valores de campo eléctrico máximo en cadenas con accesorios correctores
Fuente: (Papailiou & Schmuck, 2013, p. 295)

Máximo valor de campo eléctrico en kV/cm en superficie cercana a terminal AT, simulada por varios fabricantes para diseño de aislador cadena simple/cadena doble							
Fabricante	A (cs)	A (cd)	B	C	D (cs)	D (cd)	E
Anillo anti corona	NO	SI	SI	SI	NO	SI	SI
Tensión de Servicio							
115	3.7-6.3				5.3-5.8		
138	3.6-8.5						
161					3.0-6.8	1.0-5.0	1.9-6.8
235	5.7	2.0-6.6			8.0	2.0-3.8	
345		6.0	3.0-4.5	3.8		3.5	
500		4.2	3.6-7.0	4.3		3.3-4.7	5.4
765		4.00	3.7			8.3	

(cs): Cadena simple, (cd): Cadena doble

Los accesorios correctores con las mejores dimensiones geométricas reducirán el impacto del intenso campo eléctrico sobre la superficie del aislador y sus áreas sensibles. Existen factores externos que pueden alterar su desempeño (agua, contaminación, temperatura, altitud, rayos UV, etc.). En el Capítulo III se muestra la metodología propuesta del proceso de corrección.

2.2 Marco conceptual

En este apartado se introducen los conceptos de potencial y campo eléctrico; además se describe la formulación matemática clásica para un aislador de material continuo, considerando las capacitancias parasitas producidas por la interacción electrostática con una estructura metálica.

2.2.1 Potencial y campo eléctrico

La distribución del campo eléctrico en los aisladores depende, entre otros, de su geometría, la configuración de la torre, la geometría del elemento de fijación, el nivel de tensión de la línea y la proximidad de las fases cercanas (A. Phillips et al., 2008)

El campo eléctrico \vec{E} en cierto punto $P_{(x,y,z)}$ puede calcularse usando la ecuación (2.1):

$$\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y + \vec{E}_z \frac{kV}{cm} \quad (2.2)$$

En (2.3) se muestra el gradiente de potencial o intensidad de campo eléctrico:

$$|-\nabla V| = |\vec{E}| = \sqrt{|\vec{E}_x|^2 + |\vec{E}_y|^2 + |\vec{E}_z|^2} \frac{kV}{cm} \quad (2.3)$$

En el caso de los aisladores, el análisis de la distribución del campo eléctrico debe realizarse por regiones, ya que es un elemento conformado por diferentes materiales. A seguir, se muestra el modelo matemático clásico para el análisis del campo y potencial eléctrico sobre la superficie de un aislador polimérico.

2.2.2 Modelo para cálculo de tensión en la superficie de aisladores poliméricos

Los modelos para aisladores poliméricos se basan en la solución de las ecuaciones diferenciales para líneas de transmisión muy largas. La Fig. 2.19, muestra el modelo de circuito eléctrico desarrollado por (Al Dhalaan & Elhirbawy, 2003b) y (Yang et al., 2012). Haciendo algunas modificaciones, este modelo puede utilizarse para describir un aislador polimérico contaminado (contaminación).

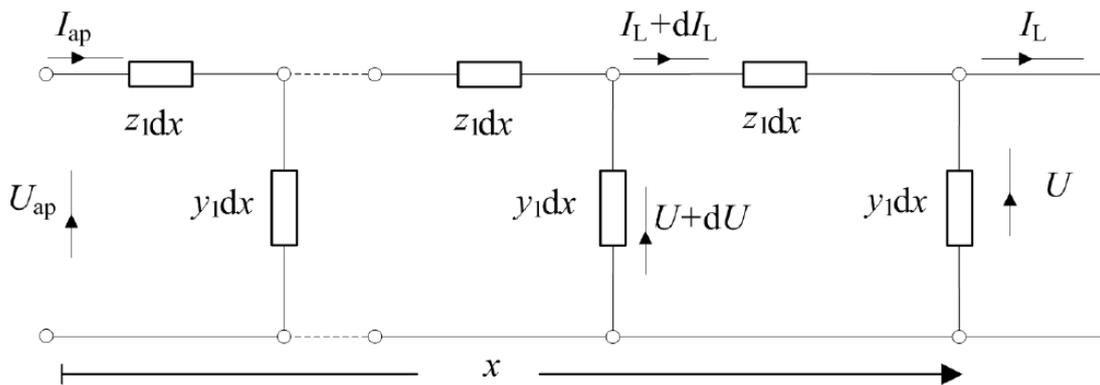


Fig. 2.19 Circuito eléctrico equivalente para un aislador polimérico contaminado

Fuente: (Yang et al., 2012, p. 759)

En la Fig. 2.19, la tensión y corriente aplicadas son \vec{U}_{ap} e \vec{I}_{ap} , mientras que la corriente de fuga es \vec{I}_L . Considerando $z_1(\Omega/cm)$ como la impedancia por unidad de longitud del conjunto aislador - capa contaminada, $y_1(S/cm)$ como la admitancia por unidad de longitud de las capacitancias parásitas a tierra, entonces la tensión \vec{U} e \vec{I}_L vienen dada por (2.4) y (2.5), respectivamente.

$$\vec{U} = \vec{U}_{ap} \cosh(\gamma x) - (Z_c \sinh(\gamma x)) \vec{I}_{ap} \quad (2.4)$$

$$\vec{I}_L = -\left(\frac{\sinh(\gamma x)}{Z_c}\right) \vec{U}_{ap} + (\cosh(\gamma x)) \vec{I}_{ap} \quad (2.5)$$

Donde x (cm) es la longitud de fuga, $Z_c = \sqrt{z_1/y_1}$, $\gamma = \sqrt{z_1 y_1}$. Los vectores \vec{I}_L e \vec{I}_{ap} (A) están en fase con los vectores \vec{U} y \vec{U}_{ap} (V), por tanto, la forma escalar simplificada de la tensión y la corriente en cualquier segmento del aislador, U e I_L , son dadas por (2.6) y (2.7), respectivamente.

$$U = U_{ap} \cosh(\gamma x) - (Z_c \sinh(\gamma x)) I_{ap} \quad (2.6)$$

$$I_L = -\left(\frac{\sinh(\gamma x)}{Z_c}\right) U_{ap} + (\cosh(\gamma x)) I_{ap} \quad (2.7)$$

Por tanto, la tensión y corriente aplicadas vienen dadas por (2.8) y (2.9).

$$I_{ap} = \frac{1}{\cosh(\gamma x)} \left(I_L + \frac{\sinh(\gamma x)}{Z_c} U_{ap} \right) \quad (2.8)$$

$$U_{ap} = U \cosh(\gamma x) + I_L Z_c \sinh(\gamma x) \quad (2.9)$$

Finalmente, la tensión en cada segmento del aislador en función de la tensión aplicada y la corriente de fuga es:

$$U = \frac{1}{\cosh \gamma x} U_{ap} - \left(\frac{Z_c \sinh \gamma x}{\cosh \gamma x} \right) I_L \quad (2.10)$$

Usando la ecuación (2.10) puede graficarse el potencial y campo eléctrico variando parámetros capacitivos (por distancia a estructura) y resistivos (por contaminación). Los parámetros de la TABLA N° 2.5 se usan como base para aplicación del modelo de aislador polimérico.

TABLA N° 2.5 Parámetros de prueba para el cálculo en aislador polimérico
(Fuente: Elaboración propia)

L (cm)	N° Aletas	L _{aleta} (cm)	I _l (mA)	R (ohm)	z ₁ (ohm/cm)	C _{tot} (F)	y _{tot} (F)	y ₁ (S/cm)	Z _c	γ
1100	141	7.8	1.3	10 ¹⁰	R / L _{aleta}	3x10 ⁻¹¹	2*π*f* C _{tot}	y _{tot} / L _{aleta}	(z ₁ / y ₁) ^{0.5}	(z ₁ * y ₁) ^{0.5}

Las gráficas en Fig. 2.20 y Fig. 2.21 muestran como varía el potencial a lo largo de un aislador polimérico en función del parámetro resistencia relacionado a la contaminación. En esas figuras se observa que el potencial y campo eléctrico disminuyen al alejarse de la zona energizada.

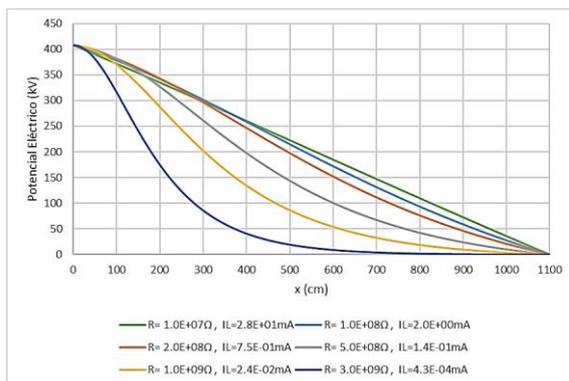


Fig. 2.20 Potencial ante variación de resistencia por contaminación ($C_t = 30\text{pF}$)
(Fuente: Elaboración propia)

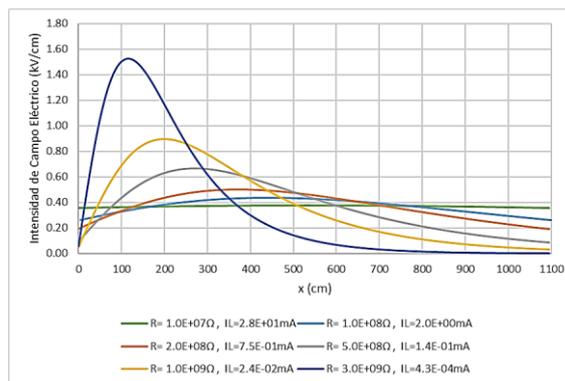


Fig. 2.21 Campo eléctrico ante variación de resistencia por contaminación ($C_t = 30\text{pF}$)
(Fuente: Elaboración propia)

Las gráficas en Fig. 2.22 y Fig. 2.23 muestran la influencia de la variación de la capacitancia parásita a tierra, C_t .

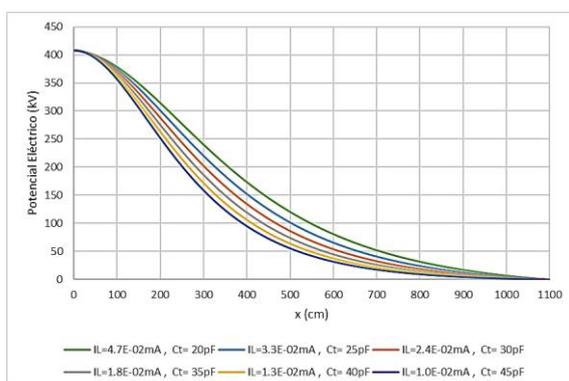


Fig. 2.22 Potencial ante variación de Capacitancia parásita a tierra ($R = 1.0\text{E}+09\Omega$)
(Fuente: Elaboración propia)

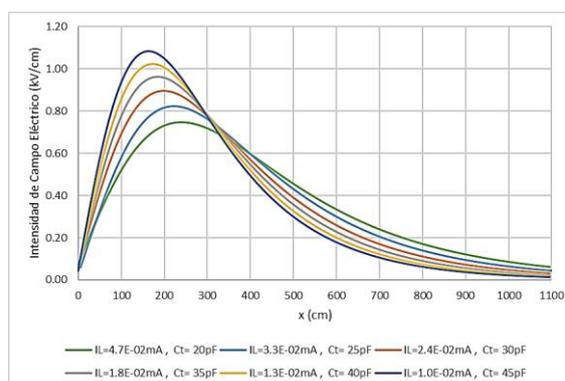


Fig. 2.23 Campo eléctrico ante variación de Capacitancia parásita a tierra ($R = 1.0\text{E}+09\Omega$)
(Fuente: Elaboración propia)

En Fig. 2.22 y Fig. 2.23 puede apreciarse la forma de la distribución continua del campo eléctrico a lo largo de un aislador polimérico, brindando un importante rango de parámetros referenciales. Cabe mencionar que las ecuaciones contemplan la influencia de una torre o estructura metálica, más no la influencia de agentes geométricos externos, como el suelo, los conductores, accesorios correctores, etc. Por consiguiente, el campo eléctrico en situaciones reales es diferente y para hallarlo se requieren programas por computador de cálculo numérico.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EN DIMENSIONAMIENTO DE ANILLOS CORRECTORES

3.1 Introducción

Dado que el presente trabajo aborda el análisis del campo eléctrico, se propone una metodología en dimensionamiento de anillos correctores. Consiste en la ejecución de simulaciones, basadas en el método de elementos finitos. Esta metodología se organiza en el flujograma de la sección 3.2.

Dentro de la metodología se incluye la técnica de barrido paramétrico, que se describe en la sección 3.1.4, con la cual se logra obtener un conjunto de datos (curvas de campo eléctrico) que, con ayuda de ciertos indicadores y criterios, se consigue limitar el máximo valor del campo eléctrico, aliviar el punto crítico y seleccionar la mejor configuración de anillos correctores, en aisladores poliméricos.

3.1.1 Curva característica de campo eléctrico

Existe un valor para el campo eléctrico $E(x, y, z)$ para cada punto $P(x, y, z)$ dentro del espacio del modelo, el programa computacional almacena esto en una base de datos y permite seleccionar la región sobre la cual se desea conocer la magnitud del campo eléctrico.

Puede elegirse una región curvilínea de longitud $L = X_{b_n} - X_{a_n}$ sobre la superficie del aislador, y solicitar al programa extraer solo los valores de magnitud de campo eléctrico $|E|$. Esto resultará en una curva C_n como la mostrada en la Fig. 3.1.

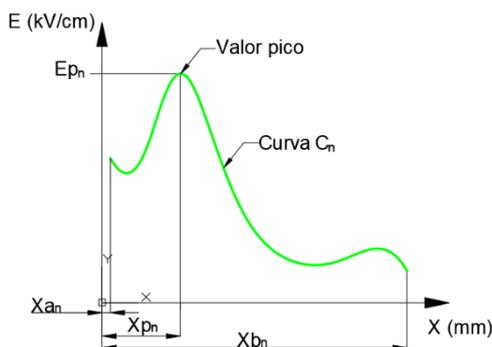


Fig. 3.1 Representación de una curva característica C_n
(Fuente: Elaboración propia)

Esta es la curva característica del campo eléctrico sobre la superficie de un aislador de una línea de alta tensión. Para el posterior análisis se definen algunos parámetros característicos en curvas de campo eléctrico, relacionados con la forma de la curva, los cuales se presentan en la TABLA N° 3.1.

TABLA N° 3.1 Parámetros característicos en curvas de campo eléctrico
(Fuente: Elaboración propia)

Parámetro característico	Propiedad
E_{p_n} : Valor pico de la magnitud del campo eléctrico en una curva C_n .	$E_{p_n} = \max_{X_{a_n} \leq x \leq X_{b_n}} E(x) \quad (kV/cm)$
X_{p_n} : Localización de E_{p_n}	$0 < X_{a_n} \leq X_{p_n} \leq X_{b_n} \quad (mm)$

3.1.2 Pasos para determinar el campo eléctrico usando método de elementos finitos

Los métodos analíticos para el cálculo del campo y potencial eléctrico son bien conocidos y toman en cuenta la posición y la geometría de las cargas. Son útiles para problemas que implican elementos de geometría simple como esferas, varillas, anillos. Sin embargo, para resolver el problema de la distribución de potenciales y gradientes a lo largo fronteras entre dieléctricos de geometría compleja como, por ejemplo, el aislador de silicona, es más conveniente la aplicación de técnicas de cálculo numérico (Chrakravorti, 2015, p. 273), como el método de elementos finitos.

A diferencia del modelo de cálculo analítico descrito en la sección 2.2.2, el método de elementos finitos atiende la necesidad de incluir la forma y tamaño, dando paso a resultados más precisos. Este método permite resolver el problema del potencial y campo eléctrico, para ello deben considerarse los siguientes pasos:

- Paso 1: Definir los parámetros físicos de los materiales.
- Paso 2: Definir la cantidad, forma y ubicación de los elementos finitos de la aleta.
- Paso 3: Identificar los nodos.
- Paso 4: Definir los valores de frontera.

Paso 5: Plantear las ecuaciones.

Paso 6: Presentar los resultados.

A seguir se presenta un ejemplo de aplicación para la aleta de un aislador polimérico.

❖ Paso 1: Definir las permitividades de los materiales

Para el caso de la aleta del aislador, su permitividad eléctrica se indica en la TABLA N° 3.2.

TABLA N° 3.2 Permitividades para aplicación del método de elementos finitos en la aleta del aislador
Fuente: (El-Refaie et al., 2016)

Material	FRP (ϵ_1)	Goma de silicona (ϵ_2)
Permitividad	7.2	4.3

❖ Paso 2: Definir la cantidad, forma y ubicación de los elementos finitos de la aleta

Para el ejemplo de aplicación de la aleta del aislador, se consideran elementos finitos triangulares, tal como se muestra en la Fig. 3.2.

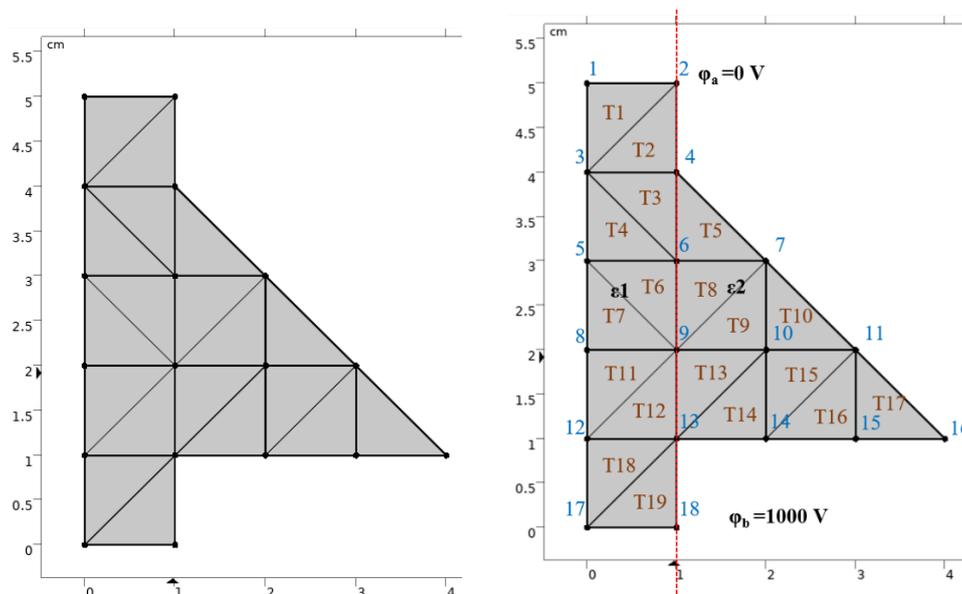


Fig. 3.2 Forma y ubicación para aplicación del método de elementos finitos en la aleta del aislador
(Fuente: Elaboración propia)

❖ Paso 3: Identificar los nodos

A partir de la Fig. 3.2 se identifican los nodos de los elementos finitos triangulares considerados, los cuales se muestran en la TABLA N° 3.3.

TABLA N° 3.3 Coordenadas nodales para aplicación del método de elementos finitos en la aleta del aislador
(Fuente: Elaboración propia)

Nodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Eje x	0	1	0	1	0	1	2	0	1	2	3	0	1	2	3	4	0	1
Eje y	5	5	4	4	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	0	0

❖ **Paso 4: Definir los valores de potencial en las fronteras**

Para el ejemplo de aplicación, los potenciales en los nodos 1, 2, 17, 18 son:

$$\varphi_1, \varphi_2 \rightarrow 0 V$$

$$\varphi_{17}, \varphi_{18} \rightarrow 1000 V$$

❖ **Paso 5: Plantear las ecuaciones en los nodos.**

Teniendo en cuenta los elementos mostrados en la Fig. 3.3, se plantean las ecuaciones para el nodo 3, y deberán plantearse de forma similar para el resto de nodos, siguiendo las instrucciones detalladas en (Chrakravorti, 2015).

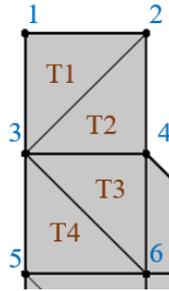


Fig. 3.3 Elementos discretizados alrededor del nodo 3
(Fuente: Elaboración propia)

Primero deberán hallarse el área de cada elemento en los alrededores del nodo 3:

$$D^{T1} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \end{bmatrix}, D^{T2} = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{bmatrix}, D^{T3} = \begin{bmatrix} x_3 & y_3 & 1 \\ x_6 & y_6 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{bmatrix}, D^{T4} = \begin{bmatrix} x_3 & y_3 & 1 \\ x_5 & y_5 & 1 \\ x_6 & y_6 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Luego deberán utilizarse estos valores para hallar los coeficientes K_1^{Ti} , K_2^{Ti} y K_3^{Ti} , cuyo sentido se establece en la ecuación 15.16 de (Chrakravorti, 2015):

$$K_1^{T3} = \frac{\varepsilon_1}{D^{T3}} [(x_4 - x_6)^2 + (y_6 - y_4)^2] \quad (3.2)$$

$$K_1^{T2} = \frac{\varepsilon_1}{D^{T2}} [(x_2 - x_4)^2 + (y_4 - y_2)^2] \quad (3.3)$$

$$K_1^{T1} = \frac{\varepsilon_1}{D^{T1}} [(x_1 - x_2)^2 + (y_2 - y_1)^2] \quad (3.4)$$

$$K_1^{T4} = \frac{\varepsilon_1}{D^{T4}} [(x_6 - x_5)^2 + (y_5 - y_6)^2] \quad (3.5)$$

$$K_2^{T1} = \frac{\varepsilon_1}{D^{T1}} [(x_1 - x_2)(x_3 - x_1) + (y_2 - y_1)(y_1 - y_3)] \quad (3.6)$$

$$K_2^{T2} = \frac{\varepsilon_1}{D^{T2}} [(x_2 - x_4)(x_3 - x_2) + (y_4 - y_2)(y_2 - y_3)] \quad (3.7)$$

$$K_2^{T3} = \frac{\varepsilon_1}{D^{T3}} [(x_4 - x_6)(x_3 - x_4) + (y_6 - y_4)(y_4 - y_3)] \quad (3.8)$$

$$K_2^{T4} = \frac{\varepsilon_1}{D^{T4}} [(x_6 - x_5)(x_3 - x_6) + (y_5 - y_6)(y_6 - y_3)] \quad (3.9)$$

$$K_3^{T1} = \frac{\varepsilon_1}{D^{T1}} [(x_1 - x_2)(x_2 - x_3) + (y_2 - y_1)(y_3 - y_2)] \quad (3.10)$$

$$K_3^{T2} = \frac{\varepsilon_1}{D^{T2}} [(x_2 - x_4)(x_4 - x_3) + (y_4 - y_2)(y_3 - y_4)] \quad (3.11)$$

$$K_3^{T3} = \frac{\varepsilon_1}{D^{T3}} [(x_4 - x_6)(x_3 - x_4) + (y_6 - y_4)(y_4 - y_3)] \quad (3.12)$$

$$K_3^{T4} = \frac{\varepsilon_1}{D^{T4}} [(x_6 - x_5)(x_5 - x_3) + (y_5 - y_6)(y_3 - y_5)] \quad (3.13)$$

Con esto se tendrán definidos los valores de las siguientes ecuaciones:

$$F_1 = K_3^{T1} \quad (3.14)$$

$$F_2 = K_2^{T1} + K_3^{T2} \quad (3.15)$$

$$F_3 = K_1^{T1} + K_1^{T2} + K_1^{T3} + K_1^{T4} \quad (3.16)$$

$$F_4 = K_2^{T2} + K_3^{T3} \quad (3.17)$$

$$F_6 = K_2^{T3} + K_3^{T4} \quad (3.18)$$

$$F_5 = K_2^{T4} \quad (3.19)$$

Finalmente se tiene una ecuación lineal que relaciona los valores de potencial de los demás nodos alrededor del nodo 3, con las distancias hacia el mismo.

$$F_1\varphi_1 + F_2\varphi_2 + F_4\varphi_4 + F_6\varphi_6 + F_5\varphi_5 + F_3\varphi_3 = 0 \quad (3.20)$$

Donde:

- El superíndice “Ti” denota el elemento número “i”.
- D^{Ti} es dos veces el área del elemento.
- ε_j es la permitividad del material “j”.
- x_i, y_j representan las coordenadas de cada nodo.

Habiéndose obtenido los coeficientes para la ecuación (3.20) se obtendrá una ecuación lineal con 6 incógnitas, donde φ_1, φ_2 son 0V. Este procedimiento debe repetirse para los demás nodos alrededor del nodo 3. Al final se obtendrá un conjunto de ecuaciones lineales con igual número de incógnitas cuyas soluciones serán los potenciales desconocidos $\varphi_4, \varphi_6, \varphi_5, \varphi_3$.

Todos los pasos anteriores deberán repetirse para el resto de elementos y nodos, encontrándose los valores de los potenciales desconocidos en los nodos $\varphi_3, \varphi_4, \dots, \varphi_{16}$.

Adicionalmente, si se desea obtener el campo eléctrico, solo se deberán aplicar las ecuaciones (3.21), (3.22) y (3.23).

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x} = -\alpha_2, \quad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y} = -\alpha_3 \quad (3.21)$$

$$\alpha_2 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \varphi_1 & y_1 \\ 1 & \varphi_2 & y_2 \\ 1 & \varphi_3 & y_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}} = \frac{1}{D} [\varphi_1(y_2 - y_3) + \varphi_2(y_3 - y_1) + \varphi_3(y_1 - y_2)] \quad (3.22)$$

$$\alpha_3 = \frac{\begin{vmatrix} \varphi_1 & 1 & x_1 \\ \varphi_2 & 1 & x_2 \\ \varphi_3 & 1 & x_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}} = \frac{1}{D} [\varphi_1(x_3 - x_2) + \varphi_2(x_1 - x_3) + \varphi_3(x_2 - x_1)] \quad (3.23)$$

❖ Paso 6: Presentar los resultados

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones del Paso 5, los valores de potenciales eléctricos en los nodos pueden mostrarse, tal como se indica en la Fig. 3.4

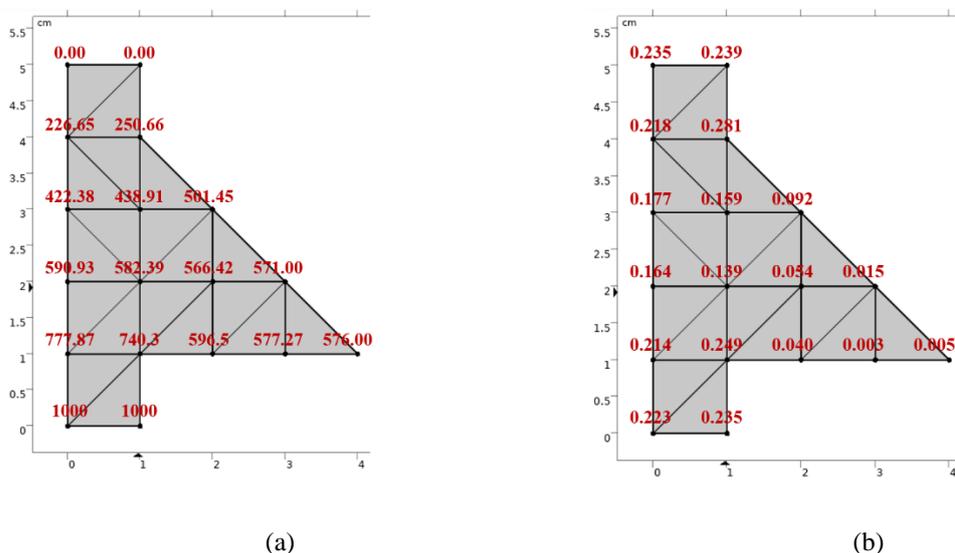


Fig. 3.4 Valores de (a) Potencial en V y (b) Campo eléctrico en kV/cm, en nodos de la aleta del aislador (Fuente: Elaboración propia)

La Fig. 3.5 muestra la curva característica de una aleta de goma de silicona, indicando en el nodo 4 (0.281 kV/cm) un gradiente de potencial que excede en 13% al del nodo 13 (0.249 kV/cm). El MEF incrementará su precisión con la adición de nodos y elementos.

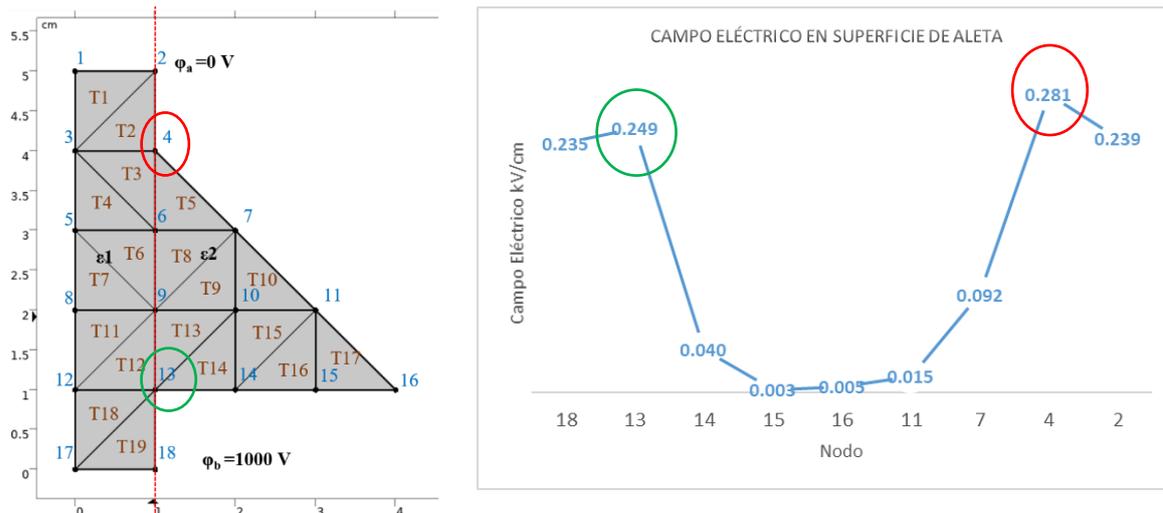


Fig. 3.5 Curva característica del campo eléctrico en borde de aleta
(Fuente: Elaboración propia)

El modelo es simple, pero su desarrollo de forma manual demanda mucho tiempo. Además, para completar el modelo hacen falta más elementos como aletas, anillos, conductores, entre otros. Por tanto, es necesario el uso de una herramienta computacional. En la metodología propuesta se utiliza el software *Comsol Multiphysics*, basado en MEF, para la determinación del potencial y campo eléctrico. Parte de la metodología propuesta se basa en los pasos y condiciones presentados en el *Brochure 284* del CIGRE (CIGRE, 2005), donde se presentan algunas aplicaciones mediante el uso de programas computacionales.

3.1.3 Pasos para determinar el campo eléctrico usando programas computacionales

En el ANEXO B se detallan los pasos para el modelamiento en Comsol y la obtención del campo eléctrico.

3.1.4 Técnica de barrido paramétrico

La técnica de barrido paramétrico se basa en los trabajos de (Tanushri Doshi, 2010, p. 42) y (Murawwi & El-Hag, 2011). Se aplica a los parámetros dimensionales de los accesorios correctores a fin de observar su desempeño en la mitigación de los altos valores de campo eléctrico sobre el aislador.

Es un proceso que consiste en la variación de los parámetros de la variable independiente (parámetros espacio geométricos de los accesorios correctores), dentro de un rango de valores, a fin de obtener un conjunto de datos de salida para cada caso.

Por ejemplo, si un accesorio corrector tiene las siguientes dimensiones:

- Radio menor = 25 mm
- Radio mayor = 200 mm
- Posición vertical respecto de punto de anclaje = 300 mm

El conjunto de valores iniciales para el barrido paramétrico puede ser como sigue:

- Conjunto de valores para radio menor = { 10, 20, 25, 30, 40 } mm
- Conjunto de valores para radio mayor = { 100, 150, 200, 250, 300 } mm
- Conjunto de valores para posición vertical respecto de punto de anclaje = { 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 } mm

Al aplicar el barrido paramétrico sobre el ejemplo descrito, se obtendrán 225 combinaciones, donde cada combinación generará su propio conjunto de datos de salida.

En el presente trabajo, se varía la posición y los radios de los accesorios correctores, luego ejecutando simulaciones, se obtienen y almacenan valores del campo eléctrico sobre los aisladores poliméricos.

3.1.5 Variables, dimensiones e indicadores metodológicos

En la TABLA N° 3.4 se describen las variables y dimensiones involucradas como parte del diseño de la metodología de la investigación aplicada en la presente Tesis.

TABLA N° 3.4 Variables, dimensiones e indicadores metodológicos
(Fuente: Elaboración propia)

Variables	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente X: Metodología en dimensionamiento de anillos correctores.	X1: Geometría del modelo	Dimensiones y ubicación de los anillos (m): Se refieren a las dimensiones geométricas propias del aislador y de los anillos, como el radio mayor, radio menor, y la distancia al punto con conexión a la alta tensión.
	X2: Grado de discretización de los elementos del modelo	Número de elementos discretizados en dominios “Nd” (Und.): Es el número total de elementos tetraédricos que se forman al discretizar todas las regiones espaciales del modelo
	X3: Herramienta computacional seleccionada.	Tiempo de ejecución del mallado “Ts” (s): Es el tiempo que tarda el programa en generar la malla tetraédrica en el entorno de simulación
Variable dependiente Y: Reducción del estrés eléctrico en aisladores poliméricos.	Y1: Limitación del máximo valor del campo eléctrico en aisladores poliméricos.	Factor de reducción del valor pico “kl (%)”: La limitación del máximo valor del campo eléctrico en aisladores poliméricos queda cuantificada por el factor de reducción del valor pico kl_n , el cual se muestra en la TABLA N° 3.5, el cual es aplicable para una curva determinada Cn.
	Y2: Alivio del punto crítico en aisladores poliméricos.	Factor de alejamiento del punto crítico “kp (%)”: El alivio del punto crítico en aisladores poliméricos queda cuantificado por el factor de alejamiento del punto crítico kp_n , el cual se muestra en la TABLA N° 3.5, el cual es aplicable para una curva determinada Cn.

	Y3: Selección de la mejor configuración de anillos correctores en aisladores poliméricos.	Factor de corrección “kc (%)”. Para la selección de la mejor configuración de anillos correctores en aisladores poliméricos se combinan los factores de la TABLA N° 3.5, obteniéndose un factor de corrección kc_n para un conjunto de curvas.
--	---	--

3.1.6 Indicadores y criterios de selección

Una curva característica depende de la geometría de los accesorios correctores, al aplicar un barrido paramétrico, se generará un conjunto de curvas C_n , como en la Fig. 2.21, donde n solo identifica a la curva, siendo $n = \{1, 2, 3, \dots, m\}$.

En la Fig. 3.6 se representan dos curvas C_0 y C_n , donde la curva C_0 se toma como referencia y las curvas C_n son aquellas que se generan al variar la geometría de los dispositivos correctores.

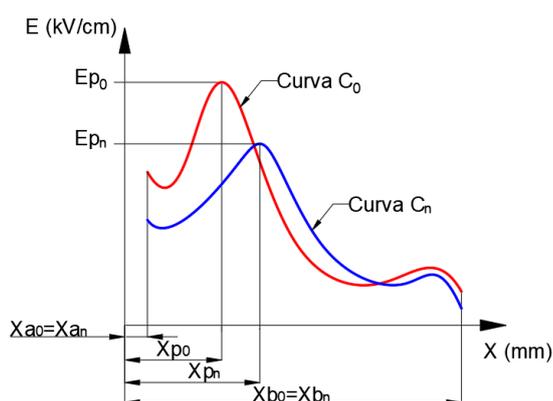


Fig. 3.6 Representación de curvas C_0 y C_n
(Fuente: Elaboración propia)

Al efectuar las simulaciones se obtienen conjuntos de curvas que deben ser evaluadas, por ello se requiere introducir indicadores y criterios de selección. En la TABLA N° 3.5 se presentan estos indicadores y criterios de selección para poder comparar una curva C_n respecto de una curva de referencia C_0 .

TABLA N° 3.5 Indicadores para el análisis de curvas características
(Fuente: Elaboración propia)

Indicador		Criterio
kl_n : Factor de reducción del valor pico	$kl_n = \frac{Ep_0 - Ep_n}{Ep_0}$ (%)	$0 < kl_n < 1$ $\uparrow kl_n \rightarrow \uparrow$ Limitación
kp_n : Factor de alejamiento del punto crítico	$kp_n = \frac{Xp_n - Xp_0}{Xp_n}$ (%)	$0 < kp_n < 1$ $\uparrow kp_n \rightarrow \uparrow$ Alivio

n: Numero de curva correlativo.

Donde kl_n indica el factor de reducción del valor pico, el cual cuantifica la limitación del campo eléctrico sobre la superficie del aislador; y kp_n indica el factor de alejamiento del punto crítico, el cual cuantifica el alivio del punto crítico del aislador. Nótese que no se consideran aquellos valores negativos.

Puede darse el caso que en un grupo de curvas C_n , algunas muestren un factor de limitación favorable, pero el factor de alivio sea desfavorable, es por ello que se requiere introducir un tercer indicador que permita decidir la selección de la mejor curva dentro de un conjunto de curvas. En la TABLA N° 3.6 se introduce el factor de corrección kc_n . Dentro del conjunto de curvas será mejor aquella cuyo indicador kc_n sea mayor. Luego de esto podrá decirse que la curva característica de campo eléctrico ha sido mejorada, y podrán seleccionarse los parámetros espacio - geométricos de los accesorios correctores más adecuados.

TABLA N° 3.6 Factor de corrección para un conjunto de curvas características
(Fuente: Elaboración propia)

Indicador		Criterio
kc_n : Factor de corrección	$kc_n = kl_n kp_n$ (%)	$0 < kc_n < 100\%$ $\uparrow kc_n \rightarrow \uparrow$ Corrección

Los indicadores y criterios solo son aplicables para curvas cuyos valores hayan sido obtenidos sobre un mismo recorrido. Pueden aplicarse en diferentes escenarios climáticos.

3.2 Flujograma de la metodología propuesta

La metodología propuesta se divide en dos partes, para la primera parte se presenta el flujograma 1 de la Fig. 3.7, donde se busca establecer un modelo computacional para un escenario climático específico, donde puedan hallarse valores de campo eléctrico sobre la superficie del aislador.

La segunda parte de la metodología se presenta en el flujograma 2 de la Fig. 3.8, donde, con ayuda de la plantilla obtenida del primer flujograma, se busca determinar las mejores dimensiones espacio geométricas de los accesorios correctores.

Los datos de entrada para el primer flujograma son la geometría del sistema por analizar (aislador, anillo, conductores, torre, etc.), sus parámetros físicos (permitividad, conductividad) y las condiciones de frontera,

Luego se describen los pasos para su aplicación, entre los que se encuentra la elección del escenario de análisis, el modelado y la implementación en un programa computacional de cálculo numérico.

La aplicación de la metodología se complementa con figuras que muestran la distribución del potencial y campo eléctrico sobre la superficie de los aisladores. Así mismo, se obtienen gráficos de superficie que muestran el efecto de la variación de los parámetros espacio - geométricos de los anillos y que permiten identificar un conjunto específico de parámetros geométricos para los accesorios correctores, que resultan ser los más favorables para la mitigación de altos valores de campo eléctrico.

3.2.1 Flujograma 1

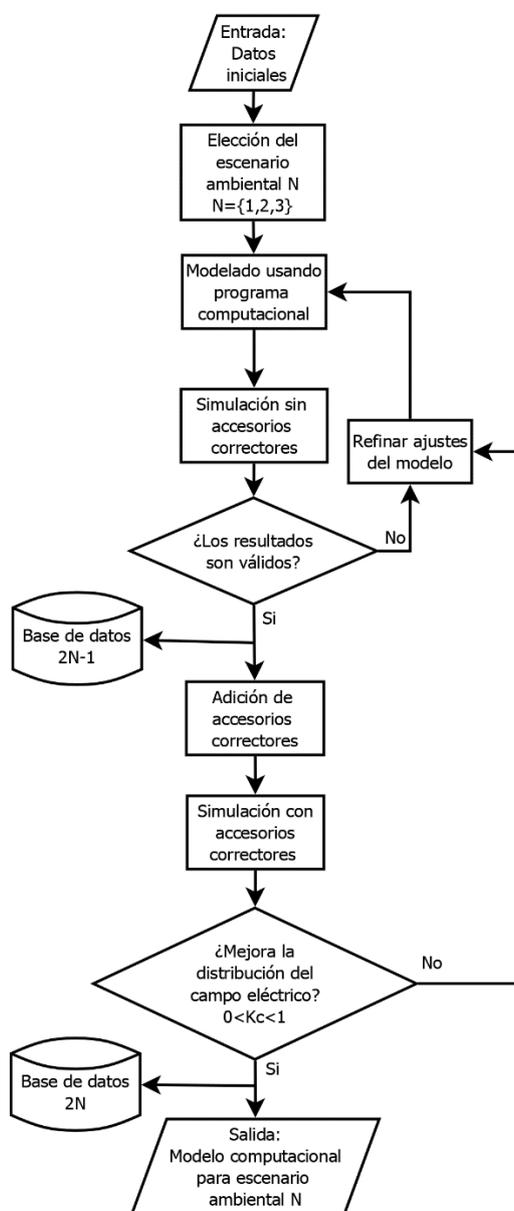


Fig. 3.7 Flujograma 1 de la metodología propuesta para el establecimiento de modelos computacionales.
(Fuente: Elaboración propia)

El flujograma 1, donde se buscan establecer plantillas modelo para diferentes escenarios climático, tiene 6 pasos:

❖ Primer paso

Establecer parámetros iniciales y datos de entrada como son los datos del aislador, los datos de los accesorios correctores, los parámetros físicos de los materiales, los valores de frontera.

❖ Segundo paso

Establecer el escenario climático $N = \{1, 2, 3\}$ que se desea analizar, ya sea un escenario de condiciones secas (1), de lluvia (2) o de contaminación (3).

❖ Tercer paso

Crear el modelo tridimensional evitando el traslape de elementos.

❖ Cuarto paso

Implementar el modelo tridimensional en el programa computacional y efectuar simulaciones sin accesorios correctores, debe verificarse que la curva de campo eléctrico sobre el aislador tenga forma hiperbólica no simétrica, en caso de obtener resultados no válidos, deberán refinarse los ajustes dentro del entorno de simulación y volver al tercer paso.

Después del cuarto paso los datos deben respaldarse.

❖ Quinto paso

Implementar accesorios correctores dentro del modelo, se simula y se evalúa si la distribución del campo eléctrico mejoro, es decir, si se redujo el valor pico del campo eléctrico respecto al cuarto paso. En caso negativo deberá refinarse los ajustes del modelo y regresar al tercer paso.

❖ Sexto paso

Después del quinto paso los datos deben respaldarse. El modelo obtenido servirá como plantilla para las posteriores simulaciones del escenario N.

Realizada la verificación se procede a añadir accesorios correctores en el modelo y se ejecutan las simulaciones.

3.2.2 Flujograma 2

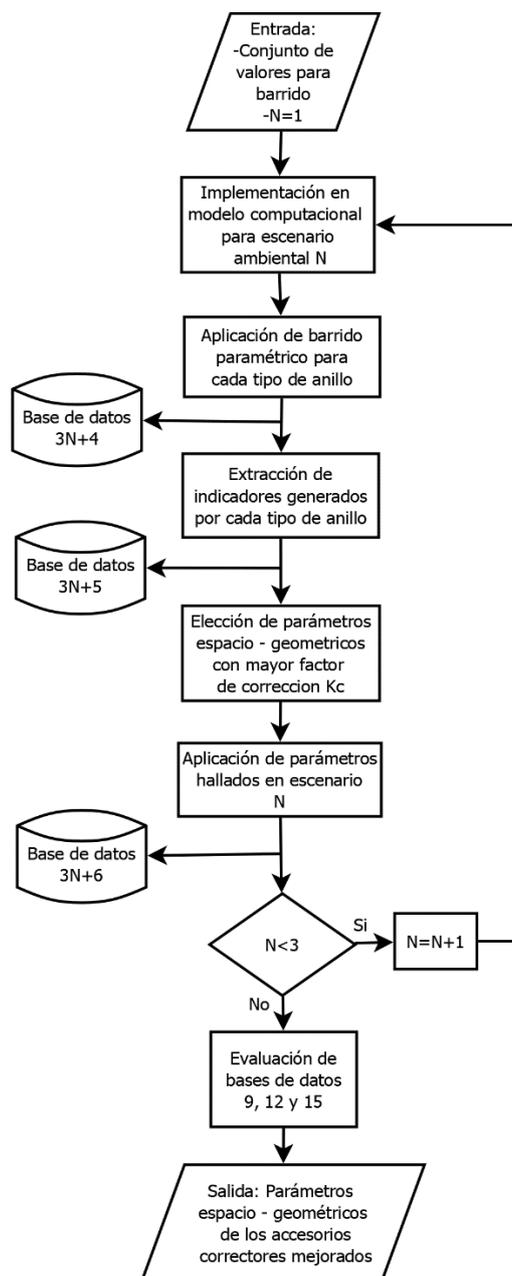


Fig. 3.8 Flujograma 2 de la metodología propuesta para la mejora de accesorios correctores de campo eléctrico
(Fuente: Elaboración propia)

El flujograma 2, en donde se busca la mejora del desempeño de los accesorios correctores para diferentes escenarios climáticos, tiene 8 pasos:

❖ Primer paso

Establecer un conjunto de valores iniciales, como el ejemplo descrito en 3.1.3, para la aplicación del barrido paramétrico.

❖ Segundo paso

Implementar el conjunto de valores iniciales establecido en el primer paso, en el modelo computacional con escenario N.

❖ Tercer paso

Aplicar el barrido paramétrico para cada tipo (A1, A2, A3) de accesorio corrector.

Luego de este paso los resultados deben respaldarse.

❖ Cuarto paso

Extraer los indicadores generados por cada combinación de parámetros para cada tipo de accesorio corrector.

Luego de este paso los resultados deben respaldarse.

❖ Quinto paso

Elegir aquella combinación de parámetros espacio geométricos con mayor factor de corrección K_c , los respaldos anteriores servirán de punto de comparación.

❖ Sexto paso

Aplicar la combinación hallada en el quinto paso, en el escenario inicial N.

Luego de este paso los resultados deben respaldarse.

❖ Séptimo paso

Repetir los pasos anteriores para cada escenario.

❖ Octavo paso

Evaluar los resultados obtenidos del sexto paso para cada escenario climático, usando los indicadores de la sección 3.1.5.

Con este paso finaliza el diagrama de flujo 2 y se obtienen como dato de salida un conjunto de parámetros espacio geométricos mejorados para los accesorios correctores. Estos datos de salida son el producto final de la metodología.

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

4.1 Introducción

Para fines de aplicación de la metodología propuesta del capítulo 3 para la corrección eficiente del campo eléctrico, los aisladores poliméricos de la estructura N° 588 línea L-5033 fueron considerados. Estos aisladores se encuentran en el tramo de línea Marcona Nueva (Poroma) - Socabaya Nueva (Yarabamba) 500kV (L-5033), el cual forma parte de la línea (MAMO) en 500kV, que es una de las más importantes del Perú.

La línea MAMO, cuyo diagrama unifilar se muestra en la Fig. 4.1, es importante porque permite que la energía generada en el centro sea transferida hacia el sur del país, atendiendo el crecimiento previsto de la demanda y contribuyendo al desarrollo de las regiones, además ayuda a elevar la confiabilidad y estabilidad del SEIN.

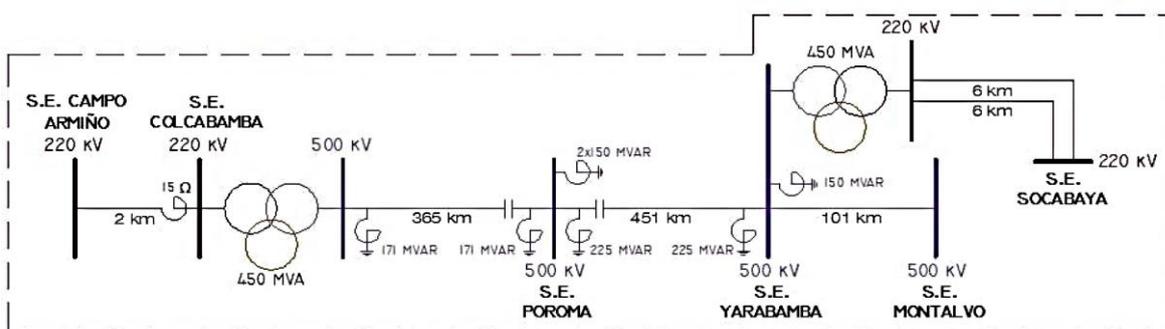


Fig. 4.1 Diagrama unifilar MAMO
(Fuente: Osinergmin, 2017 (Osinergmin, 2017, p. 17))

Estos aisladores están sometidos a muy alta tensión. El análisis presentado en esta sección considera elementos cercanos a los aisladores, como los conductores en haz, los accesorios correctores, la estructura metálica, el cable de guarda y el suelo.

Una fotografía de la estructura E588 de la línea L-5033 se muestra en la Fig. 4.2.

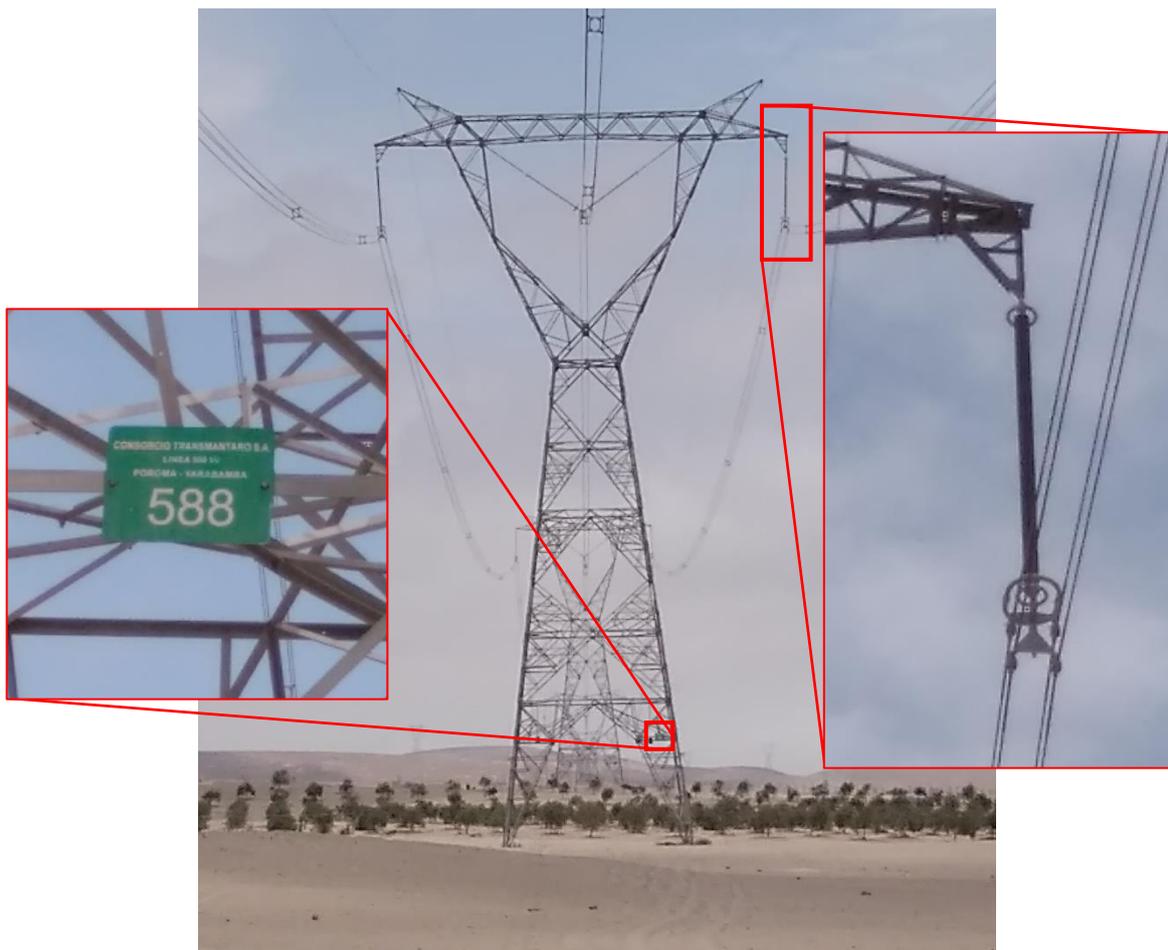


Fig. 4.2 Estructura E588 de L-5033
(Fuente: Elaboración propia)

La altura de la estructura es de 43.1 m y la distancia del suelo al terminal AT del aislador es de 35.8 m. Está ubicada a 6.88 km del mar, en la ciudad de Ocoña, en el departamento de Arequipa. La configuración de la estructura es horizontal, simple terna y con 4 conductores por fase.

Se observa la presencia de accesorios correctores, dos anillos anti corona y un anillo de distribución de campo. Notar que el anillo de distribución de campo se encuentra en la parte más baja del aislador.

4.2 Datos de entrada

Los datos de entrada de la metodología propuesta son:

4.2.1 Datos del aislador

Se utilizó el aislador polimérico tipo suspensión de la estructura E588 de la línea Poroma – Yarabamba, cuyas dimensiones se detallan en el ANEXO A

4.2.2 Datos de los accesorios correctores

La localización y dimensiones de los 3 tipos de accesorios correctores A1, A2 y A3 se describen en la Fig. 4.3.

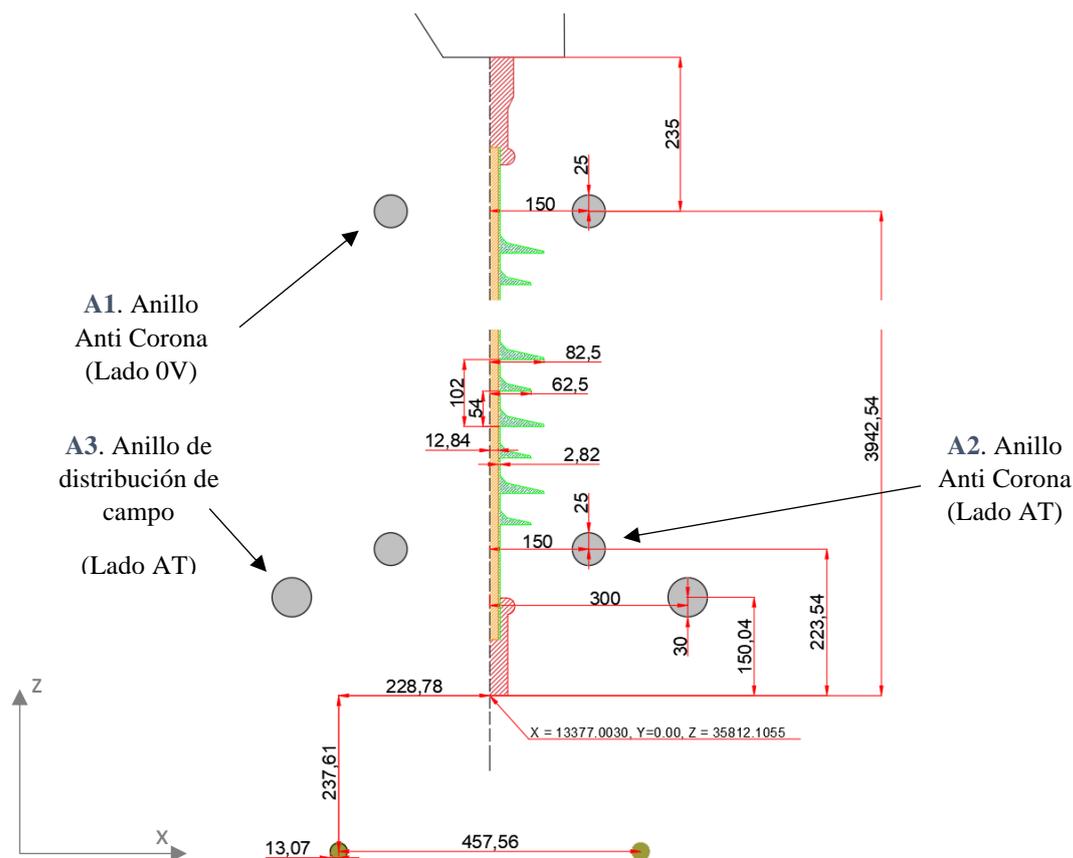


Fig. 4.3 Dimensiones y localización inicial de los anillos
(Fuente: Elaboración propia)

4.2.3 Parámetros físicos de los materiales

Los parámetros de permitividad y conductividad eléctrica de los materiales definidos en el simulador se muestran en la TABLA N° 4.1, fueron extraídos de (El-Refaie et al., 2016) y (Arshad et al., 2015).

TABLA N° 4.1 Propiedades de los materiales
Fuente: (El-Refaie et al., 2016); (Arshad et al., 2015)

N°	Material	Conductividad ($\sigma=S/m$)	Permitividad relativa (ϵ_r)
1	Acero galvanizado	1.9×10^7	1
2	Cobre	5.998×10^7	1
3	Aluminio (Para los anillos)	3.538×10^7	1
4	Aire	1×10^{-13}	1
5	Goma de silicona	1×10^{-12}	4.3
6	Núcleo FRP	1×10^{-12}	7.2
7	Gotas de agua	5.5×10^{-6}	80 (20°C)
8	Niveles de contaminación	Muy ligero	2.5×10^{-3}
		Ligero	1.125×10^{-2}
		Medio	3.38×10^{-2}
		Severo	6.755×10^{-2}
		Muy severo	1×10^{-1}

4.2.4 Valores de frontera

Los potenciales o valores de frontera iniciales en los elementos del sistema aislador-estructura son constantes y se muestran en la TABLA N° 4.2.

TABLA N° 4.2 Valores de frontera iniciales
(Fuente: Elaboración propia)

Frontera	Valor (kV)
Estructura metálica	0
Cable de guarda	0
Terminal metálico (Lado 0V)	0
Terminal metálico (Lado AT)	$500/\sqrt{3}$
Accesorios correctores (Lado 0V)	0
Accesorios correctores (Lado AT)	$500/\sqrt{3}$
Suelo	0

4.3 Definición de escenarios de análisis

Tal como fue indicado en la sección 2.1.3, las condiciones climáticas influyen en el desempeño de los aisladores poliméricos. Teniendo esto en cuenta, la metodología propuesta es aplicada para tres escenarios (Fig. 4.4): condiciones secas, de lluvia y de contaminación. Adicionalmente, en cada uno de esos escenarios se evalúan dos situaciones: la presencia y no presencia de los accesorios correctores de campo eléctrico.

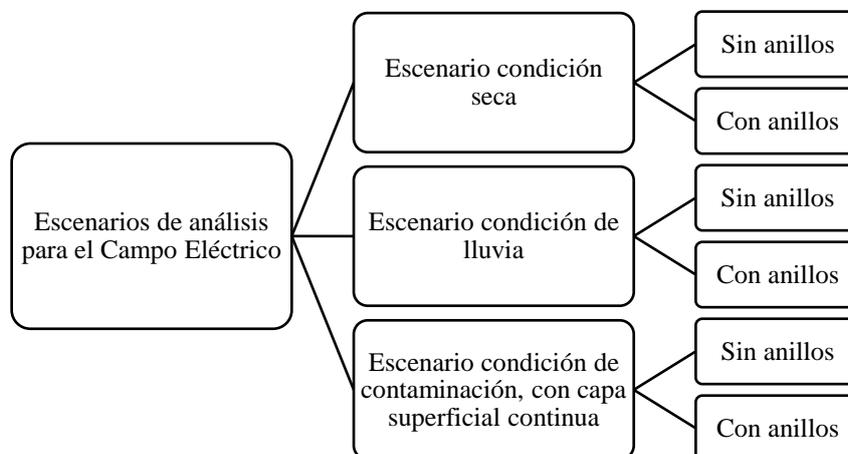


Fig. 4.4 Escenarios de análisis
(Fuente: Elaboración propia)

4.3.1 Condición seca

En un escenario en condición seca, no se considera la influencia de la humedad o contaminación. Es un escenario ideal de operación, donde la conductividad del aire es determinante y tiene un valor de $\sigma_{aire} = 10^{-13} S/m$.

4.3.2 Condición de lluvia

En un escenario de lluvia, es importante el estudio de la influencia de las gotas de agua sobre el campo eléctrico para el control de este y el diseño de aisladores poliméricos. Se considera que las gotas mantienen un ángulo de contacto constante, el cual se detalla en el ANEXO B. La conductividad del aire se mantiene igual que para el escenario anterior.

4.3.3 Condición de contaminación

Para el escenario con contaminación, se considera una fina capa de contaminación de 2mm de espeso, esta capa es continua y sin presencia de bandas secas.

4.4 Plataforma computacional utilizada

En el presente trabajo se utiliza el programa *Comsol Multiphysics* versión 5.5 (Zhang et al., 2019). En la Fig. 4.5 se muestra la interfaz del programa, el cual permite realizar simulaciones de elementos finitos, y fue seleccionado debido a su sencillez y su capacidad de soportar la geometría complicada del aislador polimérico. Se usó un procesador de 4 núcleos de 3.6 GHz, 16 Gb de Memoria RAM.

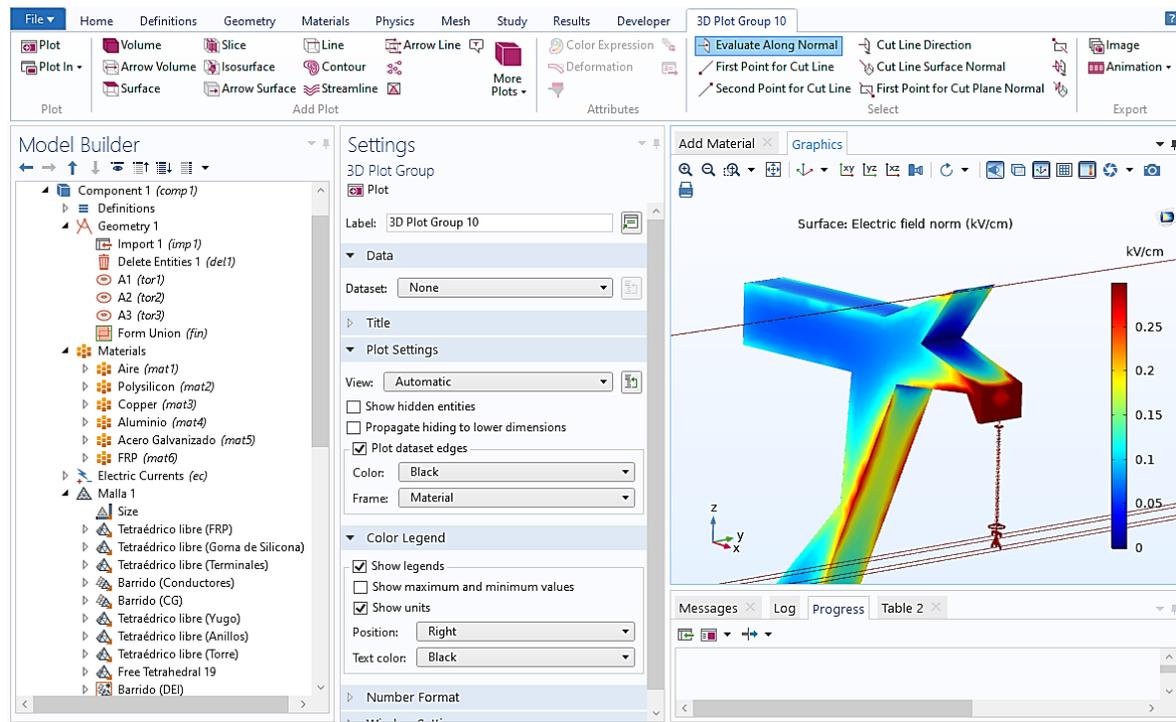


Fig. 4.5 Entorno de simulación
(Fuente: Elaboración propia)

4.4.1 Modelado y simulación

Los datos de entrada para el modelado fueron descritos en la sección 4.2. La información se extrae a lo largo de la superficie de las 72 aletas del aislador (Fig. 4.6), contabilizándose a partir del terminal AT y finalizando en el terminal 0V.



Fig. 4.6 Distancias acumuladas a lo largo de la superficie del aislador
(Fuente: Elaboración propia)

La secuencia de modelado y simulación es similar para cualquiera de los escenarios. Los pasos para el modelado y simulación del sistema aislador polimérico – estructura usando Comsol se presentan en el ANEXO B.

En la TABLA N° 4.3 se presentan los indicadores metodológicos de la variable X “Metodología en dimensionamiento de anillos correctores” obtenidos, para cada una de las condiciones climáticas analizadas durante el modelamiento.

TABLA N° 4.3 Valores de los indicadores de la variable X
(Fuente: Elaboración propia)

Indicadores de variable X: “Metodología en dimensionamiento de anillos correctores”.			
Condición climática	Dimensiones y ubicación de los anillos (m):	Número de elementos discretizados (Nd)	Tiempo de ejecución del mallado (Ts)
Seca	Ver TABLA N° 4.12	1 025 474	4 min 25 s
Con lluvia	Ver TABLA N° 4.12	2 286 357	15 min 47 s
Con contaminación	Ver TABLA N° 4.12	1 417 636	3 min 21 s

4.5 Simulación de configuración inicial

A seguir, se presentan los grupos de resultados por simulación, donde se evalúa el campo eléctrico y potencial eléctrico, para los escenarios indicados en la sección 4.3, sin considerar y considerando la presencia de accesorios correctores de campo.

Los valores de potencial y campo eléctrico se calcularon sobre todas las regiones del modelo computacional, pero solo se presentan los obtenidos sobre la superficie del aislador y algunos elementos cercanos.

En la TABLA N° 4.4 se clasifica y codifica cada grupo de resultados por simulación.

TABLA N° 4.4 Clasificación y codificación de grupos de resultados por simulación
(Fuente: Elaboración propia)

Tipo de resultado	Escenario	Código
I. Resultados sin accesorios correctores de campo eléctrico	CS. Condición seca	I-CS
	CH. Condición de lluvia	I-CH
	CC. Condición de contaminación	I-CC
II. Resultados con presencia de accesorios correctores de campo eléctrico	CS. Condición seca	II-CS
	CH. Condición de lluvia	II-CH
	CC. Condición de contaminación	II-CC
III. Resultados del barrido paramétrico	CS. Condición seca	III-CS-A1: Variación de anillo A1
		III-CS-A2: Variación de anillo A2
		III-CS-A3: Variación de anillo A3
	CH. Condición de lluvia	III-CH-A1: Variación de anillo A1
		III-CH-A2: Variación de anillo A2
		III-CH-A3: Variación de anillo A3
CC. Condición de contaminación		

Ver ANEXO B para mayor detalle sobre el proceso de simulación y la extracción de datos en *Comsol*.

4.5.1 Condición seca

a) I-CS: Condición seca sin accesorios correctores de campo eléctrico

Debido a la ausencia de accesorios correctores, el campo eléctrico es más intenso en la zona cercana al terminal sometido a alta tensión. El potencial y campo se muestran en la Fig. 4.7, mientras que una vista 3D se muestra en la Fig. 4.8, donde también puede apreciarse la interacción del campo con la torre.

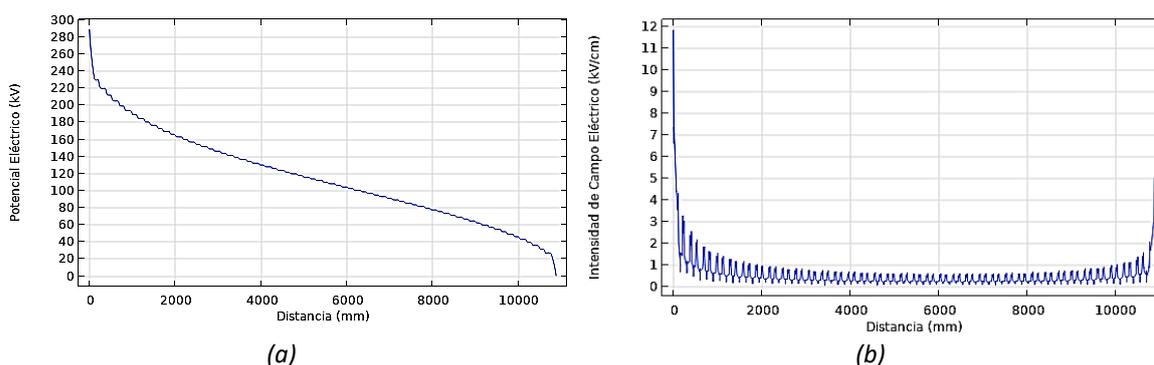


Fig. 4.7 (a) Potencial eléctrico y (b) Campo eléctrico sobre la superficie del aislador (I-CS)
(Fuente: Elaboración propia)

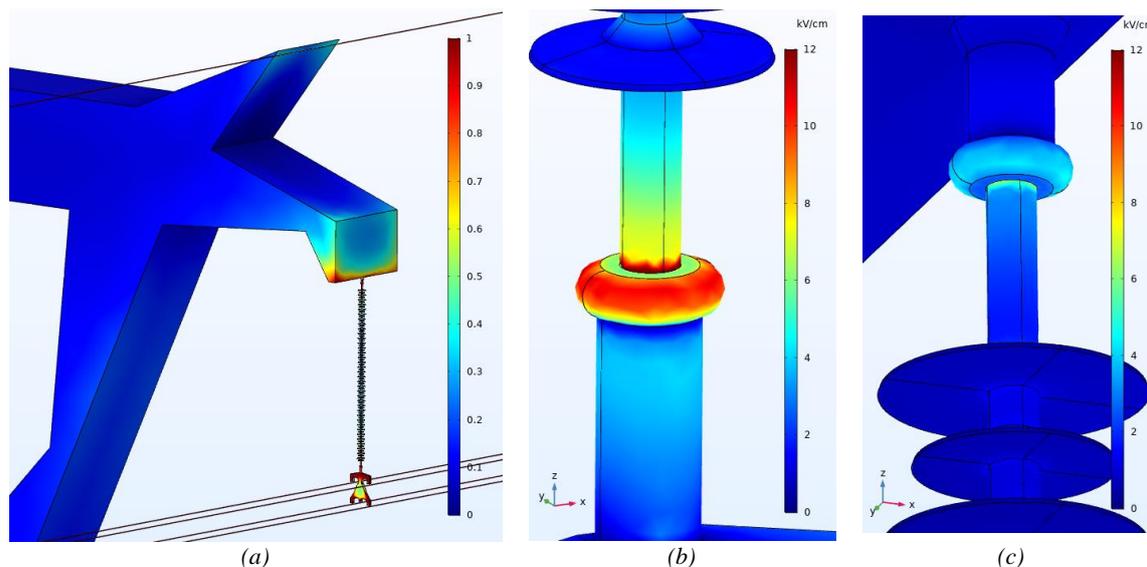


Fig. 4.8 Campo eléctrico sobre superficie 3D en (a) Torre, (b) Lado AT, (c) Lado 0V (I-CS)
(Fuente: Elaboración propia)

Los parámetros E_p y X_p descritos en la sección 3.1.1 son extraídos de la Fig. 4.7 (b), los cuales son presentados en la TABLA N° 4.5.

TABLA N° 4.5 Parámetros I-CS
(Fuente: Elaboración propia)

Ítem	Escenario	E_p – Lado AT (kV/cm)	X_p (mm)
01	I-CS	11.832	0

Como información complementaria, el valor máximo alcanzado en el lado 0V es 5.038 kV/cm.

b) II-CS: Condición seca con presencia de accesorios correctores de campo eléctrico

Los resultados de las simulaciones para el escenario de condición seca con presencia de anillos, son mostrados en las Fig. 4.9, Fig. 4.10, Fig. 4.11 y Fig. 4.12. Esta simulación intenta replicar las condiciones normales de operación del equipamiento instalado en la línea 500 kV Poroma – Yarabamba. Cabe resaltar que el perfil del campo eléctrico muestra valores menores que la simulación sin considerar anillos.

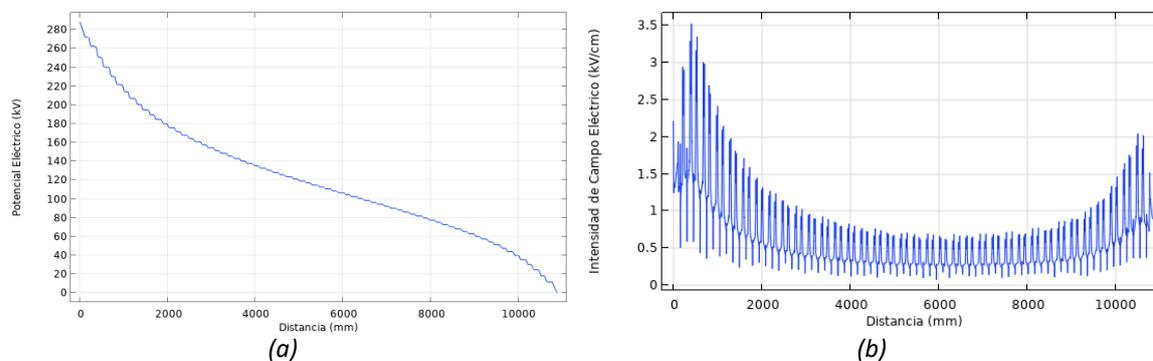


Fig. 4.9 (a) Potencial eléctrico y (b) Campo eléctrico sobre la superficie del aislador (II-CS)
(Fuente: Elaboración propia)

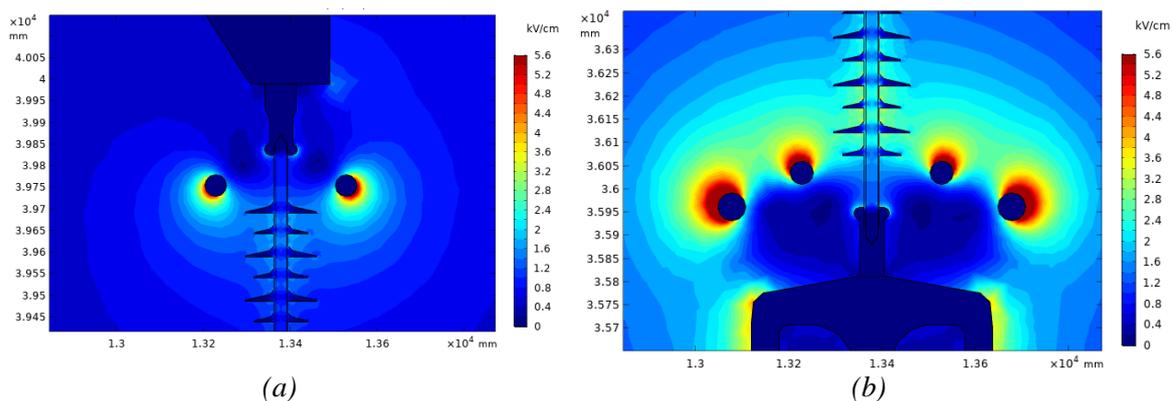


Fig. 4.10 Campo eléctrico en $y=0$ de (a) Lado 0V y (b) Lado AT (II-CS)
(Fuente: Elaboración propia)

La Fig. 4.10 muestra una vista de perfil del campo eléctrico en el lado 0V y el lado AT, aquí nótese el rol de los anillos de redistribuir el estrés eléctrico hacia sí mismos. Por otro lado, en la Fig. 4.11 se disminuyó la escala de colores para poder apreciar la interacción con la torre metálica.

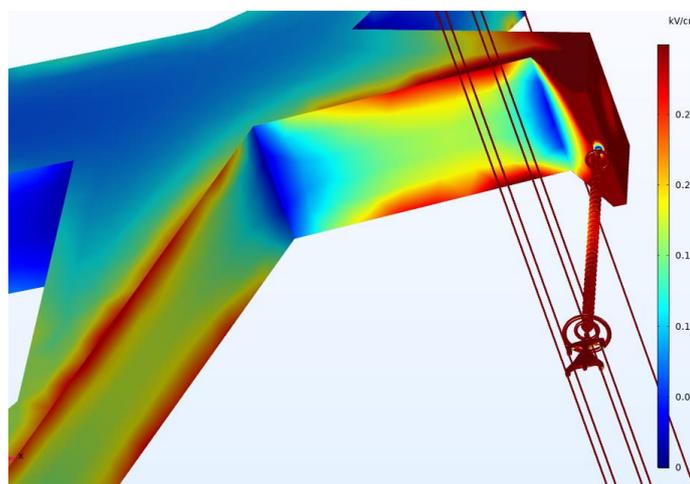


Fig. 4.11 Campo eléctrico en Torre (II-CS)
(Fuente: Elaboración propia)

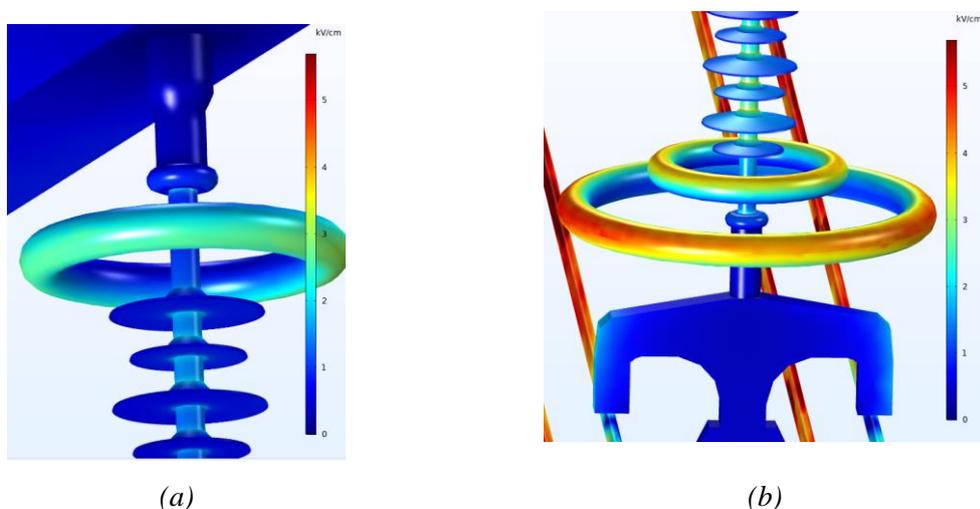


Fig. 4.12 Campo eléctrico en lado (a) 0V y (b) AT (II-CS)
(Fuente: Elaboración propia)

En la Fig. 4.12 hay regiones (lado más cercano a la torre) sobre los anillos que soportan un mayor estrés por campo eléctrico que otros.

Los parámetros E_p y X_p descritos en la sección 3.1.1 son extraídos de la Fig. 4.9 (b), los cuales son presentados en la TABLA N° 4.6.

TABLA N° 4.6 Parámetros II-CS
(Fuente: Elaboración propia)

Ítem	Escenario	E_p - Lado AT (kV/cm)	X_p (mm)
02	II-CS	3.418	407

Como información complementaria, el valor máximo alcanzado en el lado 0V es 2.054 kV/cm.

4.5.2 Condición de lluvia

a) I-CH: Condición de lluvia sin accesorios correctores de campo eléctrico

Los resultados del potencial y campo eléctrico a lo largo del aislador polimérico se muestran en la Fig. 4.13 y Fig. 4.14. Se observa que, en este escenario, el campo eléctrico presenta un incremento respecto al escenario en condición seca.

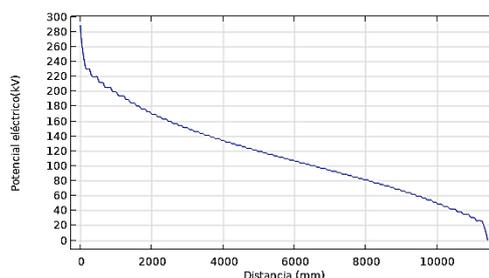


Fig. 4.13 Potencial eléctrico sobre aislador (I-CH)
(Fuente: Elaboración propia)

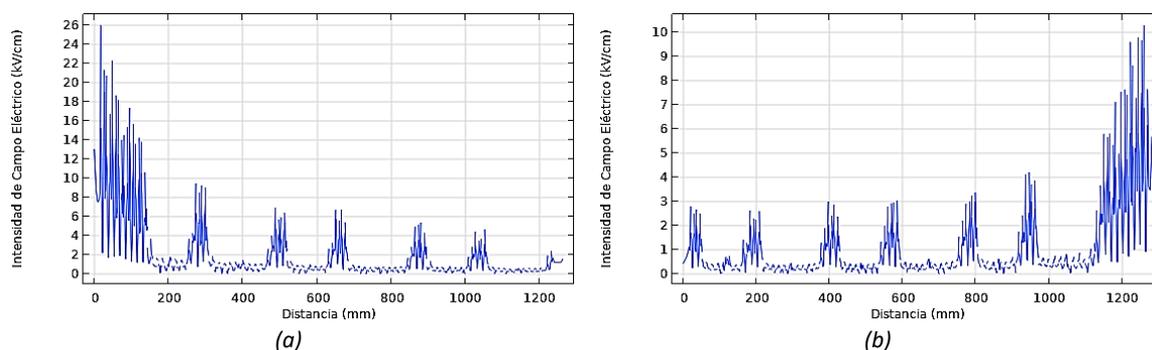


Fig. 4.14 Campo eléctrico en (a) Lado AT y (b) Lado 0V (I-CH)
(Fuente: Elaboración propia)

La Fig. 4.15 muestra altos valores de campo eléctrico alrededor de las gotas de agua.

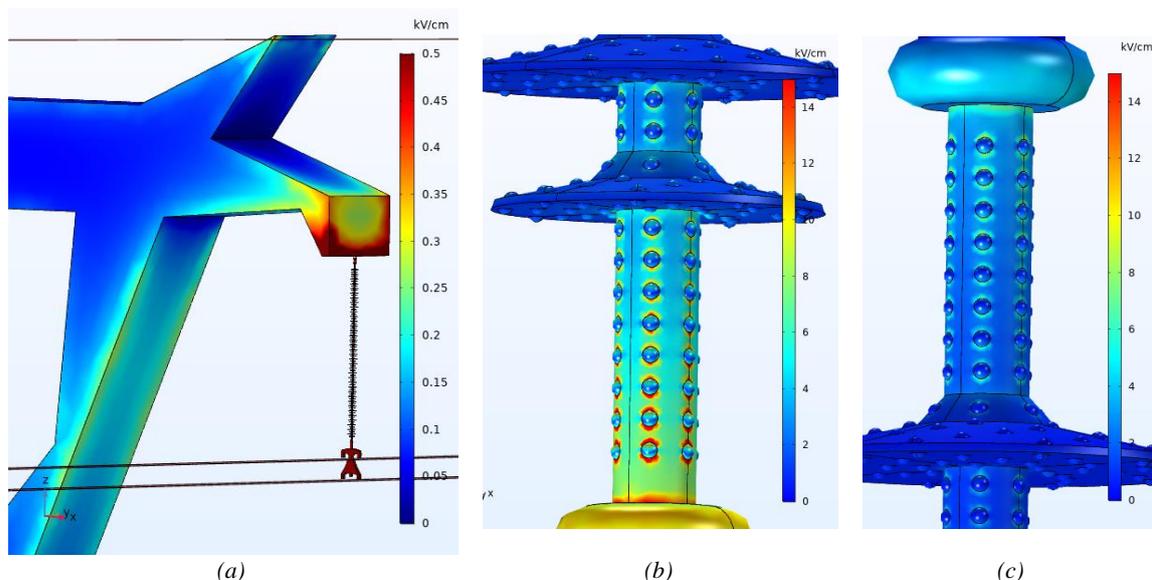


Fig. 4.15 Campo eléctrico sobre superficie de (a) Torre, (b) Lado AT, (c) Lado 0V (I-CH)
(Fuente: Elaboración propia)

Los parámetros E_p y X_p descritos en la sección 3.1.1 son extraídos de la Fig. 4.14 (a), los cuales son presentados en la TABLA N° 4.7.

TABLA N° 4.7 Parámetros I-CH
(Fuente: Elaboración propia)

Ítem	Escenario	E_p – Lado AT (kV/cm)	X_p (mm)
03	I-CH	26.085	17

Como información complementaria, el valor máximo alcanzado en el lado 0V es 10.313 kV/cm.

b) II-CH: Condición de lluvia con accesorios correctores de campo eléctrico

En las Fig. 2.12, Fig. 2.13 y Fig. 2.14 se muestran los resultados de las simulaciones considerando anillos en un escenario de lluvia y con formación de gotas de agua, alcanzando valores de hasta 9 kV/cm a causa de las gotas. Nótese que el estrés eléctrico se alejó del punto crítico, pero se acercó a las bases de la tercera y cuarta aleta.

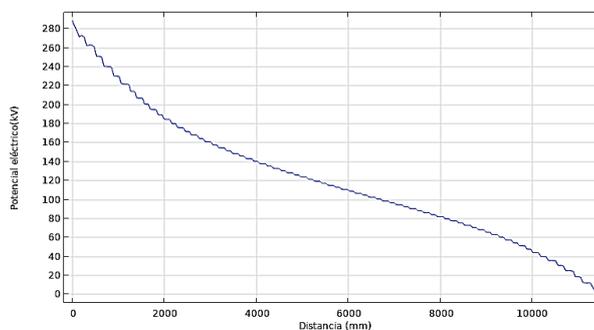


Fig. 4.16 Potencial eléctrico sobre aislador (II-CH)
(Fuente: Elaboración propia)

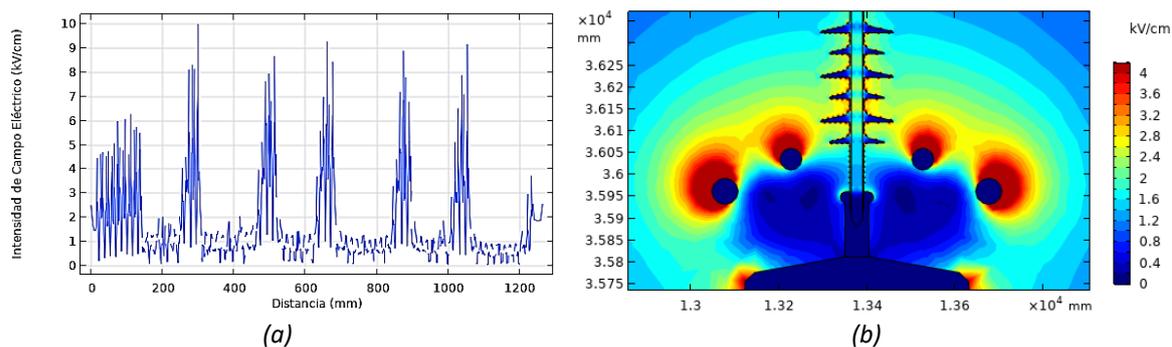


Fig. 4.17 Campo eléctrico sobre aislador en Lado AT (II-CH)
(Fuente: Elaboración propia)

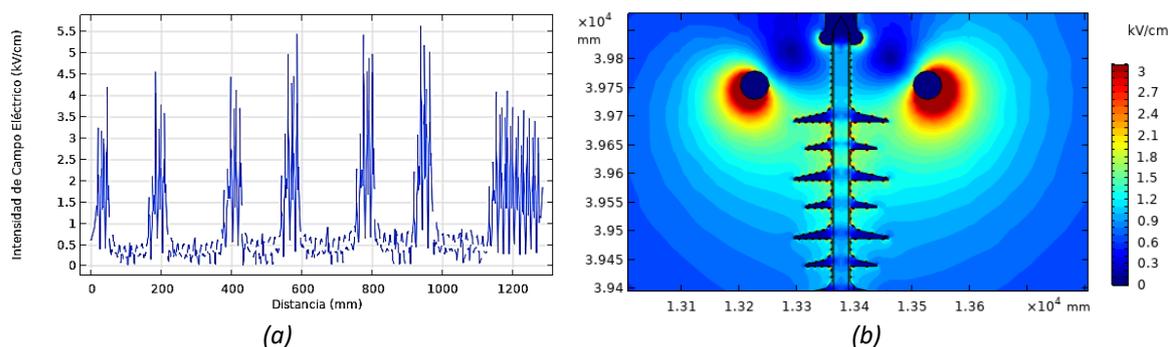


Fig. 4.18 Campo eléctrico sobre aislador en Lado 0V (II-CH)
(Fuente: Elaboración propia)

Los parámetros E_p y X_p descritos en la sección 3.1.1 son extraídos de la Fig. 4.17, los cuales son presentados en la TABLA N° 4.8.

TABLA N° 4.8 Parámetros II-CH
(Fuente: Elaboración propia)

Ítem	Escenario	E_p - Lado AT (kV/cm)	X_p (mm)
04	II-CH	9.989	299

Como información complementaria, el valor máximo alcanzado en el lado 0V es 5.656 kV/cm.

4.5.3 Condición de contaminación

a) I-CC: Condición de contaminación sin accesorios correctores de campo eléctrico

El efecto de la aplicación de una capa contaminante, sobre el potencial eléctrico y el campo eléctrico, sin la presencia de accesorios correctores, se muestran en la Fig. 4.19 y Fig. 4.20, respectivamente. La capa de contaminante es continua y cubre al aislador polimérico.

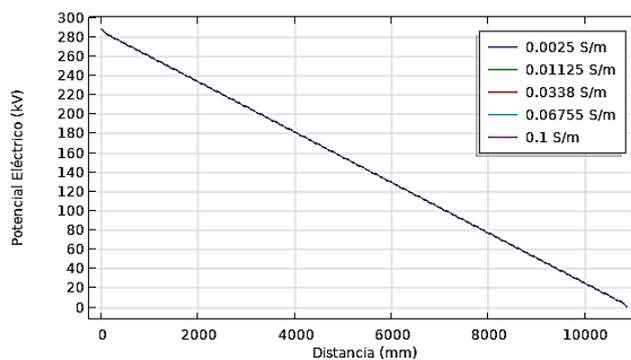


Fig. 4.19 Potencial eléctrico sobre capa contaminante (I-CC)

(Fuente: Elaboración propia)

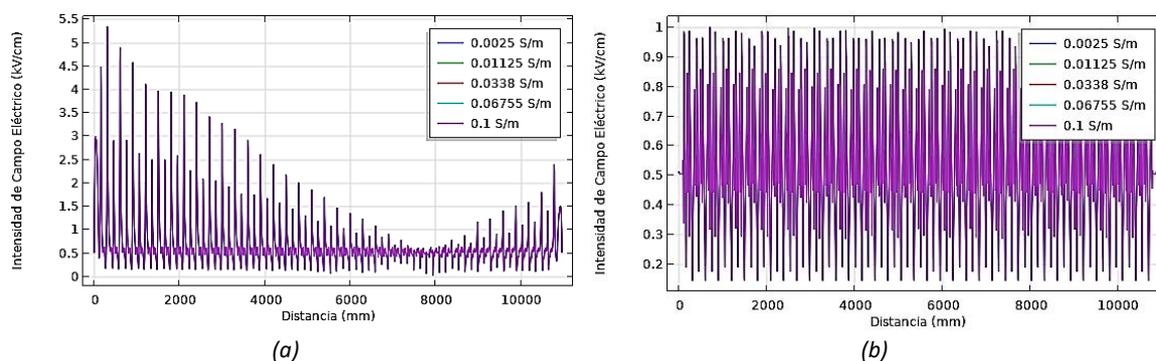


Fig. 4.20 Campo eléctrico sobre (a) capa contaminante y (b) goma de silicona (I-CC)

(Fuente: Elaboración propia)

Los parámetros E_p y X_p descritos en la sección 3.1.1 son extraídos de la Fig. 4.20, los cuales son presentados en la TABLA N° 4.9. Se incluye el parámetro E_p' para los valores pico cercanos al lado 0V. Nótese que estos indicadores fueron extraídos del resultado del cálculo del campo eléctrico por encima y por debajo de la capa contaminante, para cada uno de los cinco niveles de contaminación.

TABLA N° 4.9 Parámetros en I-CC

(Fuente: Elaboración propia)

Ítem	Escenario	Superficie	σ (S/m)	E_p – Lado AT (kV/cm)	E_p' – Lado 0V (kV/cm)	X_p (mm)
05	I-CC	Aislador	0.0025	1.042377767	1.038485980	-
06	I-CC	Aislador	0.01125	1.042377346	1.038486699	-
07	I-CC	Aislador	0.0338	1.042377311	1.038486753	-
08	I-CC	Aislador	0.06755	1.042377355	1.038486864	-
09	I-CC	Aislador	0.1	1.042377349	1.038486863	-
10	I-CC	Capa contaminante	0.0025	5.473786274	2.451761553	307
11	I-CC	Capa contaminante	0.01125	5.473788129	2.451760246	307
12	I-CC	Capa contaminante	0.0338	5.473779825	2.451764648	307
13	I-CC	Capa contaminante	0.06755	5.473790875	2.451759634	307
14	I-CC	Capa contaminante	0.1	5.473787940	2.451761240	307

b) II-CC: Condición de contaminación con accesorios correctores de campo eléctrico

El efecto de la aplicación de una capa contaminante, sobre el potencial y campo eléctrico, considerando la presencia de accesorios correctores, se muestran en la Fig. 4.21 y Fig. 4.22, respectivamente. La capa de contaminante es continua y cubre al aislador polimérico.

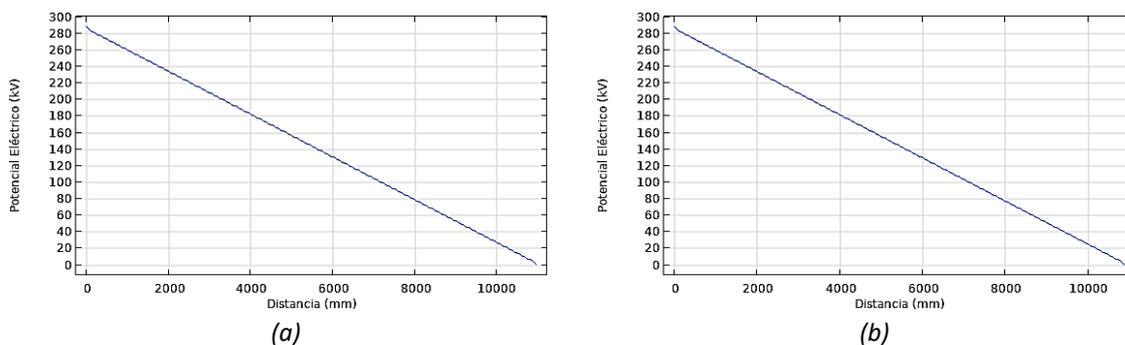


Fig. 4.21 Potencial eléctrico sobre (a) capa contaminante y (b) goma de silicona
(Fuente: Elaboración propia)

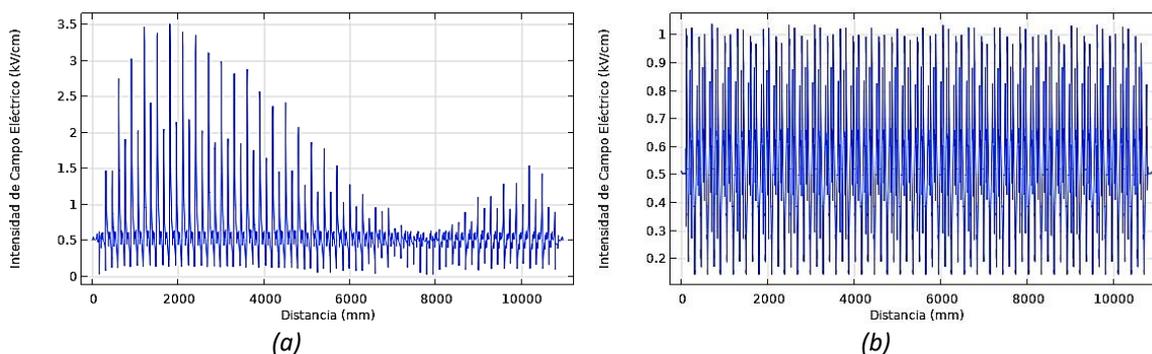


Fig. 4.22 Campo eléctrico sobre (a) superficie de capa contaminante y (b) aislador
(Fuente: Elaboración propia)

Un corte transversal al modelo, en las regiones cercanas al lado de alta tensión y al lado con 0V, muestra una concentración particular de estrés eléctrico en las puntas de las aletas, como se muestra en la Fig. 4.23 y Fig. 4.24.

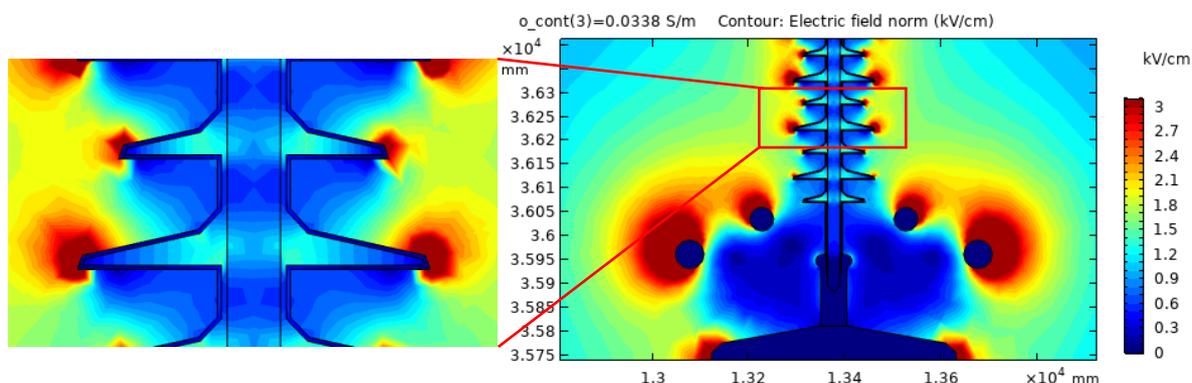


Fig. 4.23 Campo eléctrico en $y=0$, lado AT (II-CC)
(Fuente: Elaboración propia)

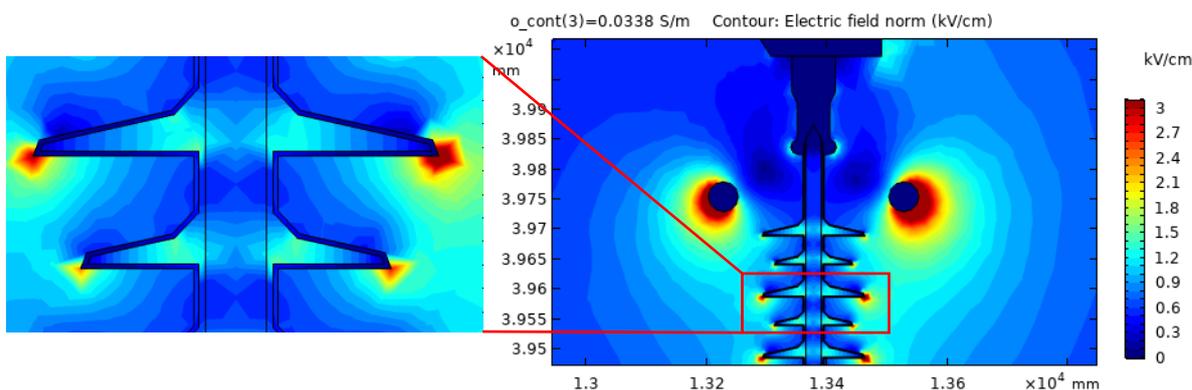


Fig. 4.24 Campo eléctrico en $y=0$, lado 0V (II-CC)
(Fuente: Elaboración propia)

Los parámetros E_p y X_p descritos en la sección 3.1.1 son extraídos de la Fig. 4.22, los cuales son presentados en la TABLA N° 4.10. Se incluye el parámetro E_p' para los valores pico cercanos al lado 0V. Nótese que estos indicadores fueron extraídos del resultado del cálculo del campo eléctrico por encima y por debajo de la capa contaminante, para cada uno de los cinco niveles de contaminación.

TABLA N° 4.10 Parámetros en II-CC
(Fuente: Elaboración propia)

Ítem	Escenario	Superficie	σ en contaminante (S/m)	E_p – Lado AT (kV/cm)	E_p' – Lado 0V (kV/cm)	X_p (mm)
15	II-CC	Aislador	0.0025	1.04203	1.03851	-
16	II-CC	Aislador	0.01125	1.04203	1.03851	-
17	II-CC	Aislador	0.0338	1.04203	1.03851	-
18	II-CC	Aislador	0.06755	1.04203	1.03851	-
19	II-CC	Aislador	0.1	1.04203	1.03851	-
20	II-CC	Capa contaminante	0.0025	3.51243	1.78531	1802
21	II-CC	Capa contaminante	0.01125	3.51246	1.78534	1802
22	II-CC	Capa contaminante	0.0338	3.51243	1.78531	1802
23	II-CC	Capa contaminante	0.06755	3.51248	1.78537	1802
24	II-CC	Capa contaminante	0.1	3.51247	1.78536	1802

4.6 Simulación aplicando barrido paramétrico

A continuación, se muestran los grupos de resultados de barrido paramétrico, sobre cada configuración inicial. Además, se presentan los parámetros característicos e indicadores de las secciones 3.1.1 y 3.1.5, para los escenarios de la sección 4.3, sin considerar y considerando la presencia de accesorios correctores de campo.

Ya que los aisladores están acompañados por tres tipos de anillos, los cuales serán analizados en tres escenarios climáticos diferentes, es conveniente asignarles nombres. Sean A1, A2 y A3 los nombres para cada tipo de anillo, el barrido paramétrico se realiza variando “r” (radio menor), “R” (radio mayor) y “H” (localización).

En consecuencia, se codifica el desfase de parámetros geométricos para los radios de cada tipo de anillo como A1dr, A1dR, A2dr, A2dR, A3dr y A3dR.

Adicionalmente, para el desfase vertical de cada anillo se asignan los códigos A1dH, A2dH y A3dH. Por ejemplo, el parámetro A2dH=10 significa un desplazamiento de +10mm sobre el eje vertical para el anillo A2.

TABLA N° 4.11 Codificación para las variaciones por barrido paramétrico
(Fuente: Elaboración propia)

Escenario	Códigos		Conjuntos de valores para barrido paramétrico (mm)
	Anillo	Variación	
Seco	III-CS-A1	A1dr	{-10,0,10}
		A1dR	{-25,0,25,50}
		A1dH	{-50,-25,0,25,50}
	III-CS-A2	A2dr	{-10,0,10}
		A2dR	{-25,0,25,50}
		A2dH	{-50,-25,0,25,50,75}
	III-CS-A3	A3dr	{-12,0,12}
		A3dR	{-60,0,60}
		A3dH	{240,180,120,60,0,-60}
Lluvia	III-CH-A1	A1dr	{-10,0,10}
		A1dR	{-25,0,50,100}
		A1dH	{-100,-50,0,50}
	III-CH-A2	A2dr	{-10,0,10}
		A2dR	{-25,0,50}
		A2dH	{-100,-50,0,50}
	III-CH-A3	A3dr	{-12,0,12}
		A3dR	{0,60,120}
		A3dH	{-60,0,60,120,240,480}

Las variaciones y desplazamientos son efectuados de acuerdo a la TABLA N° 4.11, tomando como referencia inicial la Fig. 4.3, cuyos datos se muestran en la TABLA N° 4.12.

TABLA N° 4.12 Dimensiones y localización inicial de los anillos
(Fuente: Elaboración propia)

N° Anillo	x _o (mm)	y _o (mm)	z _o (mm)	r (mm)	R (mm)	H (mm)
A1	13377.0030	0.0000	39754.6456	25	150	3942.5401
A2	13377.0030	0.0000	36035.6456	25	150	223.5401
A3	13377.0030	0.0000	35962.1456	30	300	150.0401

El conjunto de datos representativos obtenido se presenta en el ANEXO C.

4.6.1 Condición seca

En este escenario se tienen las mismas consideraciones que en la sección 4.3, con la adición de la aplicación de un barrido paramétrico para los anillos tipo A2 y A3, con el objetivo de encontrar parámetros espacio geométricos que mejoren el perfil de campo eléctrico sobre la superficie del aislador. No se presentan los resultados del barrido para el anillo A1, debido a su bajo impacto en el campo eléctrico sobre la región de alta tensión.

a) III-CS-A2: Barrido paramétrico en anillo A2

Considerando las dimensiones de los anillos A1 y A3 constantes, se ejecutó el barrido paramétrico para el anillo A2, en el escenario de condición seca, cuyos resultados han sido clasificados con la codificación III-CS-A2. Los parámetros descritos en la sección 3.1.1 pueden apreciarse en las Fig. 4.25 y Fig. 4.26.

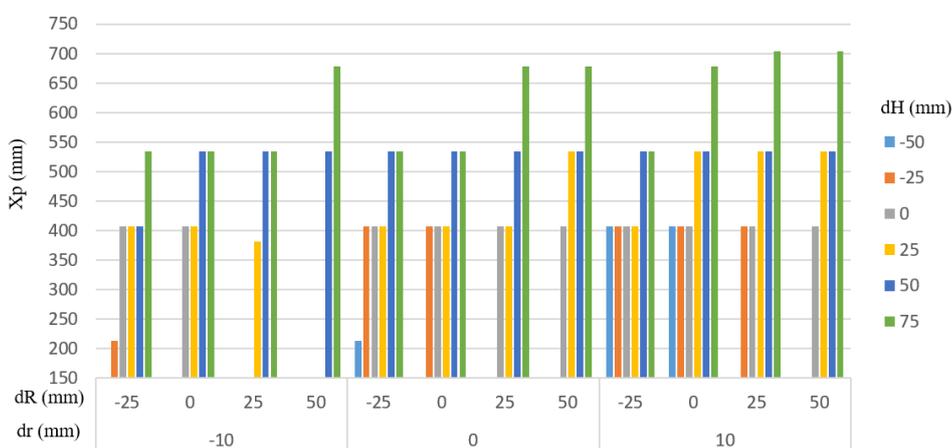


Fig. 4.25 Parámetro X_p para cada combinación del barrido III-CS-A2 (Fuente: Elaboración propia)

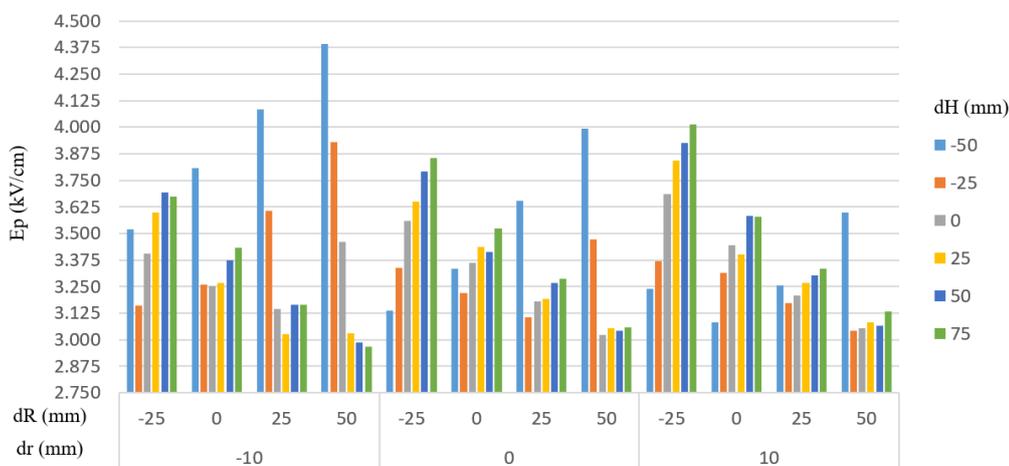


Fig. 4.26 Parámetro E_p para cada combinación del barrido III-CS-A2 (Fuente: Elaboración propia)

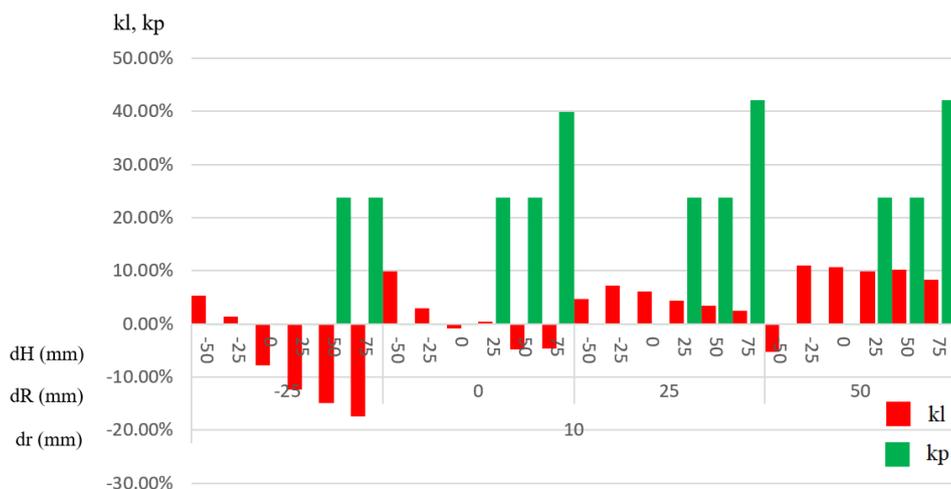


Fig. 4.29 Indicadores kl y kp para cada combinación del barrido III-CS-A2 (dr = 10)
(Fuente: Elaboración propia)

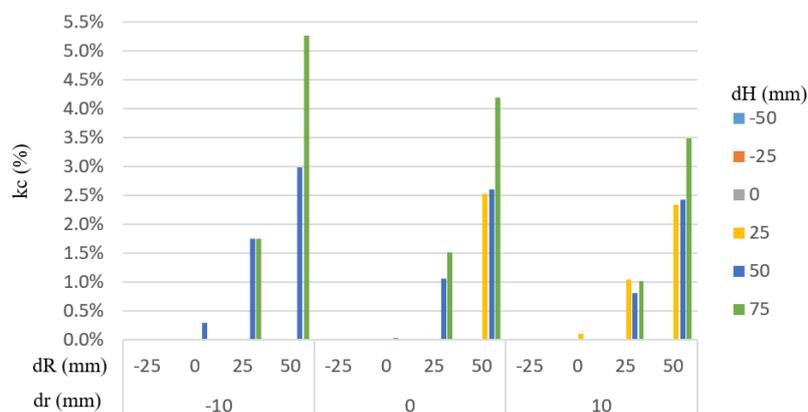


Fig. 4.30 Indicador kc para cada combinación del barrido III-CS-A2
(Fuente: Elaboración propia)

En la Fig. 4.30 solo se muestran las combinaciones que mejoran el desempeño del anillo. Del conjunto de datos la mejor combinación de parámetros para el anillo tipo A2 resulta A2dr = -10, A2dR = 50, A2dH = 75.

b) III-CS-A3: Barrido paramétrico en anillo A3

Considerando las dimensiones de los anillos A1 y A2 constantes, se ejecutó el barrido paramétrico para el anillo A3, en el escenario de condición seca, cuyos resultados han sido clasificados con la codificación III-CS-A3. Los parámetros descritos en la sección 3.1.1 pueden apreciarse en las Fig. 4.31 y Fig. 4.32.

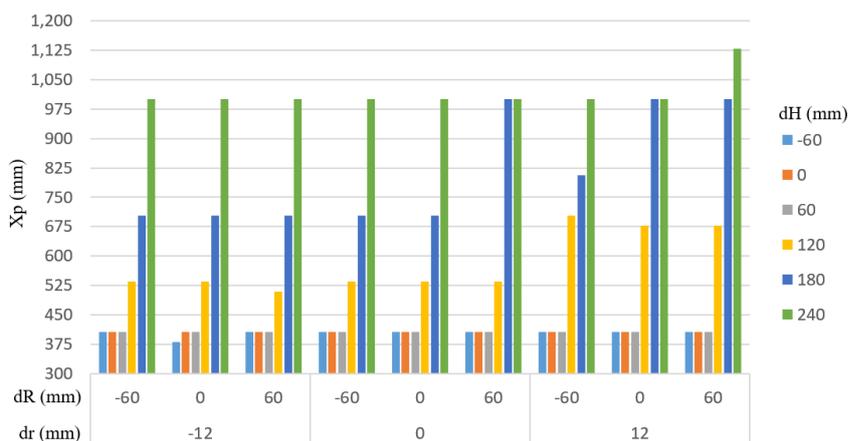


Fig. 4.31 Parámetro X_p para cada combinación del barrido III-CS-A3 (Fuente: Elaboración propia)

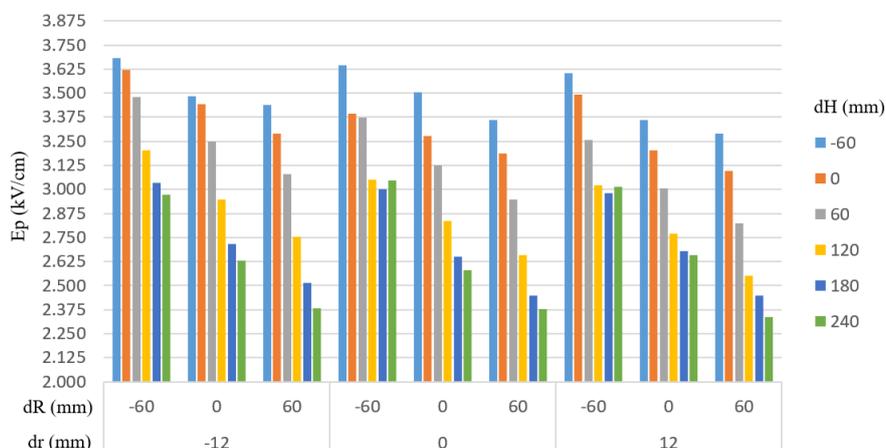


Fig. 4.32 Parámetro E_p para cada combinación del barrido III-CS-A3 (Fuente: Elaboración propia)

Adicionalmente, los indicadores descritos en la sección 3.1.5, con los cuales se basa la evaluación del desempeño de cada anillo, se presentan en las Fig. 4.33 y Fig. 4.34.

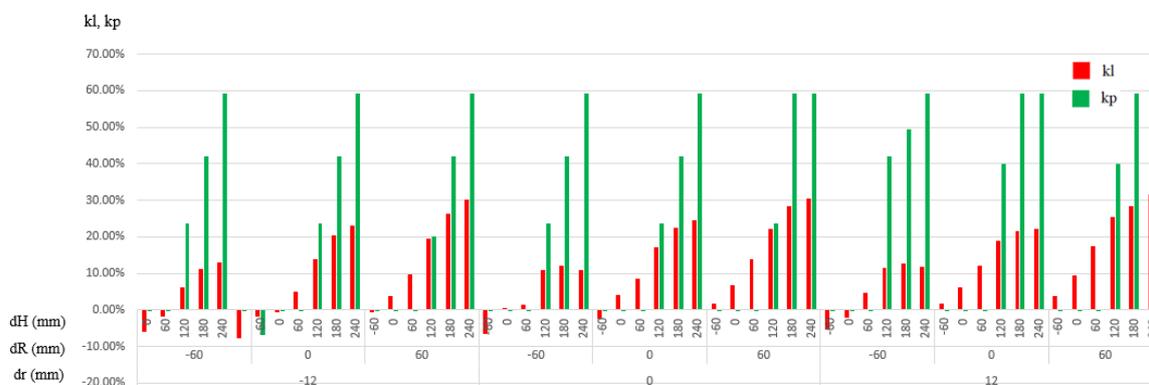


Fig. 4.33 Indicadores k_l y k_p para cada combinación del barrido III-CS-A3 (Fuente: Elaboración propia)

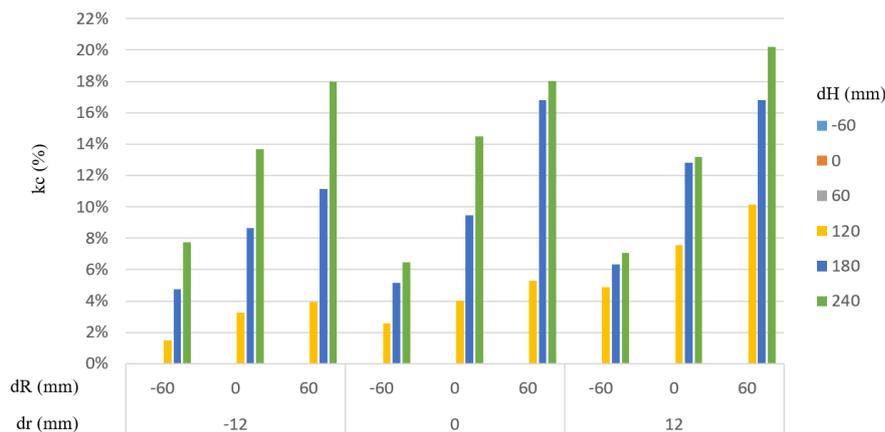


Fig. 4.34 Indicador kc para cada combinación del barrido III-CS-A3
(Fuente: Elaboración propia)

En la Fig. 4.34 solo se muestran las combinaciones que mejoran el desempeño del anillo. Del conjunto de datos la mejor combinación de parámetros para el anillo tipo A3 resulta $A3dr = 12$, $A3dR = 60$, $A3dH = 240$.

4.6.2 Condición de lluvia

En este escenario se tienen las mismas consideraciones que en la sección 4.5.2, con la adición de la aplicación de un barrido paramétrico para los anillos tipo A2 y A3, con el objetivo de encontrar parámetros espacio geométricos que mejoren el perfil de campo eléctrico sobre la superficie del aislador, cuando existan gotas de agua.

Ya que la presencia de las gotas de agua incrementa el estrés eléctrico, es de interés estudiar si es posible reducir este estrés variando las dimensiones geométricas de los anillos.

No se presentan los resultados del barrido para el anillo A1, debido a su bajo impacto en el campo eléctrico sobre la región de alta tensión.

a) III-CH-A2: Barrido paramétrico en anillo A2

Considerando las dimensiones de los anillos A1 y A3 constantes, se ejecutó el barrido paramétrico para el anillo A2, en el escenario de condición de lluvia, cuyos resultados han sido clasificados con la codificación III-CH-A2. Los parámetros descritos en la sección 3.1.1 pueden apreciarse en las Fig. 4.35 y Fig. 4.36.

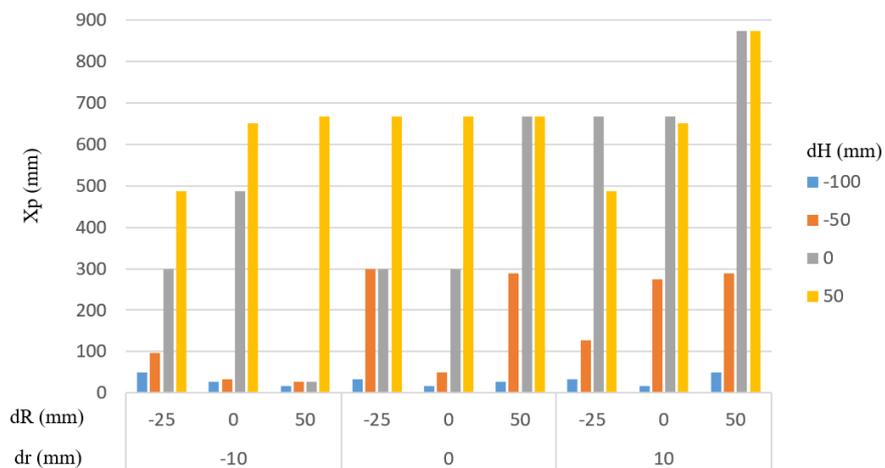


Fig. 4.35 Parámetro Xp para cada combinación del barrido III-CH-A2 (Fuente: Elaboración propia)

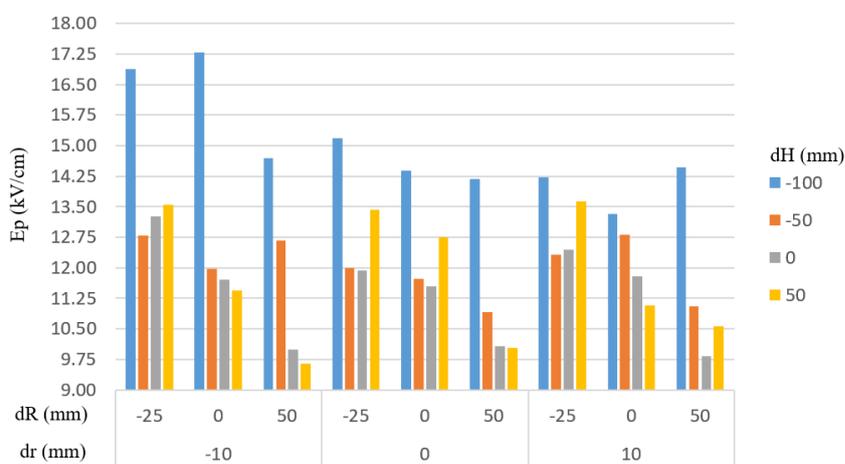


Fig. 4.36 Parámetro Ep para cada combinación del barrido III-CH-A2 (Fuente: Elaboración propia)

Adicionalmente, los indicadores descritos en la sección 3.1.5, con los cuales se basa la evaluación del desempeño de cada anillo, se presentan en las Fig. 4.37 y Fig. 4.38.

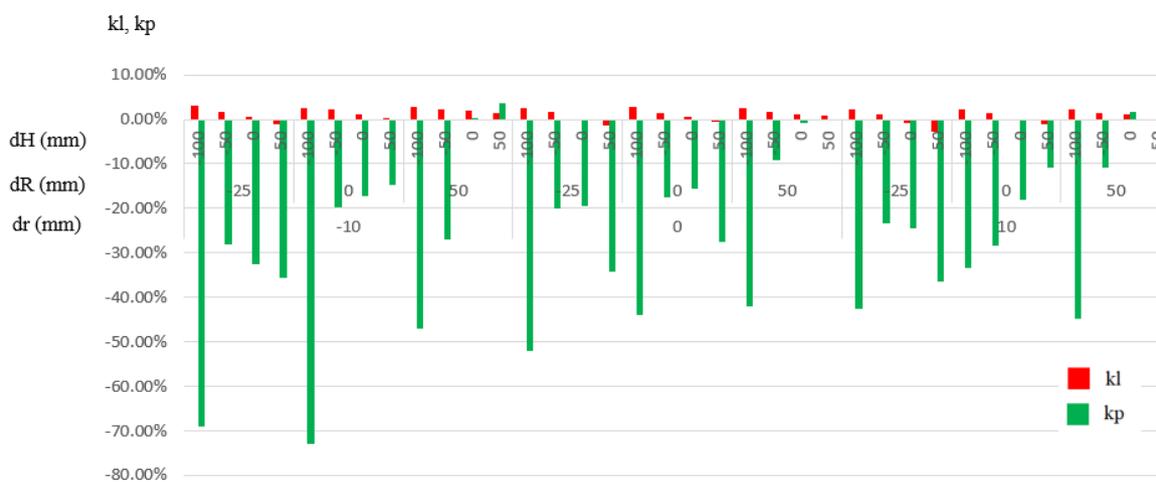


Fig. 4.37 Indicadores kl y kp para cada combinación del barrido III-CH-A2 (Fuente: Elaboración propia)

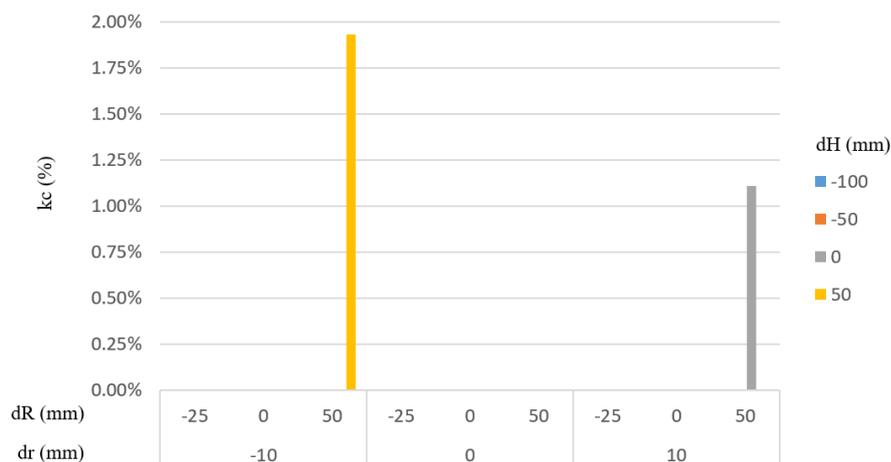


Fig. 4.38 Indicador k_c para cada combinación del barrido III-CH-A2
(Fuente: Elaboración propia)

En la Fig. 4.38 solo se muestran las combinaciones que mejoran el desempeño del anillo. Del conjunto de datos la mejor combinación de parámetros para el anillo tipo A2 resulta $A2d_r = -10$, $A2d_R = 50$, $A2d_H = 50$.

b) III-CH-A3: Barrido paramétrico en anillo A3

Considerando las dimensiones de los anillos A1 y A2 constantes, se ejecutó el barrido paramétrico para el anillo A3, en el escenario de condición de lluvia, cuyos resultados han sido clasificados con la codificación III-CH-A3. Los parámetros descritos en la sección 3.1.1 pueden apreciarse en las Fig. 4.39 y Fig. 4.40.

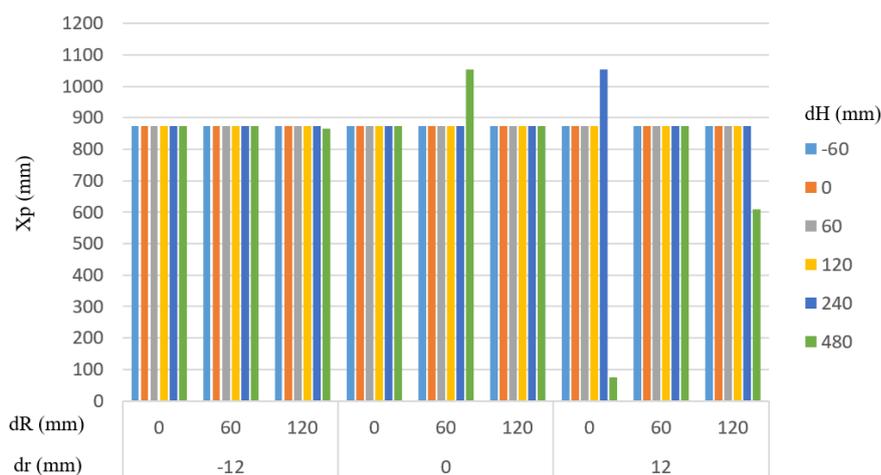


Fig. 4.39 Parámetro X_p para cada combinación del barrido III-CH-A3
(Fuente: Elaboración propia)

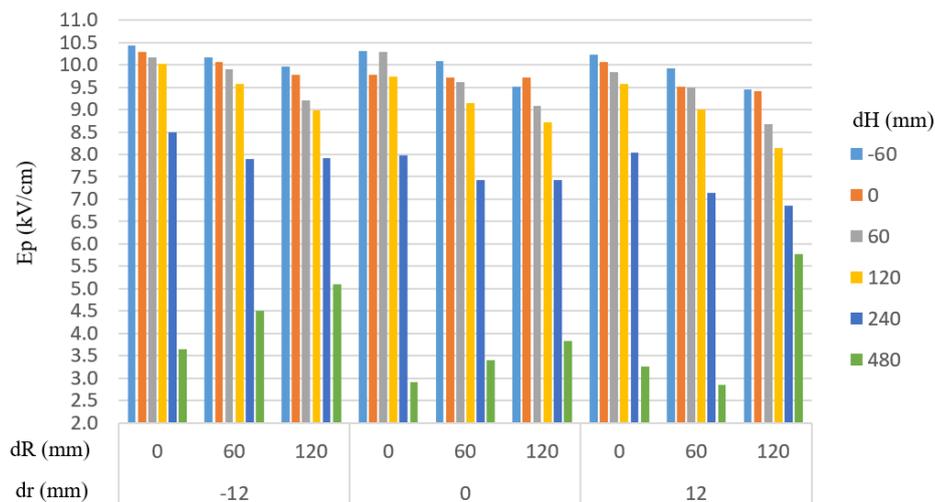


Fig. 4.40 Parámetro E_p para cada combinación del barrido III-CH-A3 (Fuente: Elaboración propia)

Adicionalmente, los indicadores descritos en la sección 3.1.5, con los cuales se basa la evaluación del desempeño de cada anillo, se presentan en las Fig. 4.41 y Fig. 4.42.

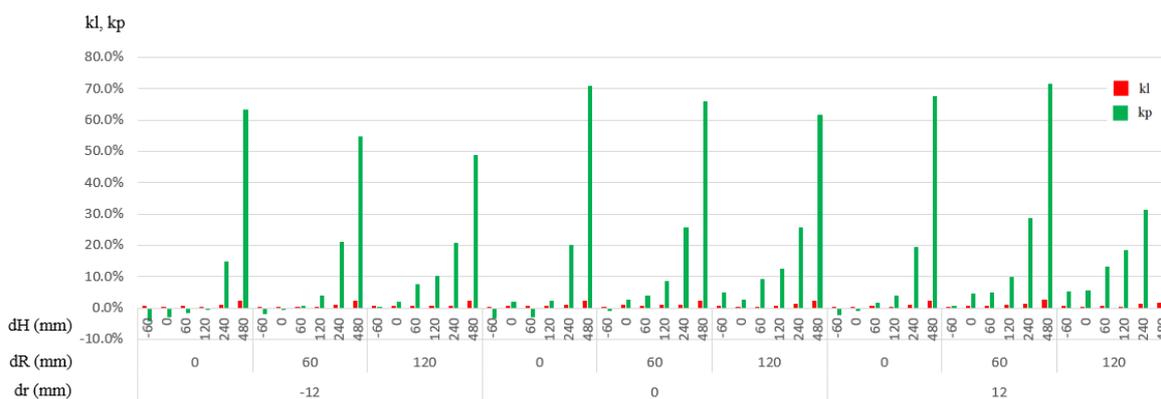


Fig. 4.41 Indicadores k_l y k_p para cada combinación del barrido III-CH-A3 (Fuente: Elaboración propia)

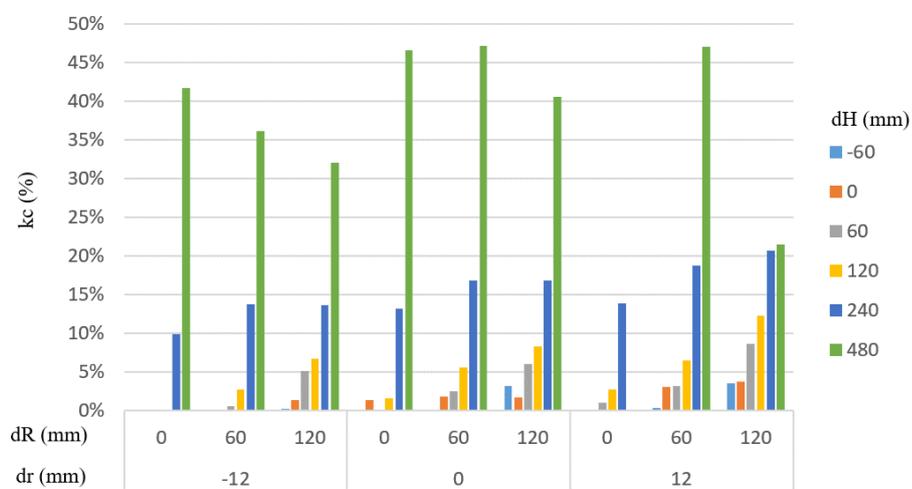


Fig. 4.42 Indicador k_c para cada combinación del barrido III-CH-A3 (Fuente: Elaboración propia)

En la Fig. 4.42 solo se muestran las combinaciones que mejoran el desempeño del anillo. Del conjunto de datos la mejor combinación de parámetros para el anillo tipo A3 resulta $A3dr = 0$, $A3dR = 60$, $A3dH = 480$

4.6.3 Condición de contaminación

Una capa contaminante continua y uniforme que cubra totalmente al aislador no incrementará el campo eléctrico, sino más bien lo reducirá. Esto lo muestran las Fig. 4.20 y Fig. 4.22 de la sección 4.5.3. Esto quiere decir que, bajo este contexto, no es necesario efectuar un barrido paramétrico para el escenario con contaminación.

Sin embargo, al aplicarse las dimensiones de los resultados del barrido paramétrico, el campo eléctrico sobre la capa contaminante se reduce un poco, como lo muestra la Fig. 4.43. Cabe mencionar que en la Fig. 4.22 de la sección 4.5.3 el máximo valor del campo eléctrico fue de 3.5 kV/cm.

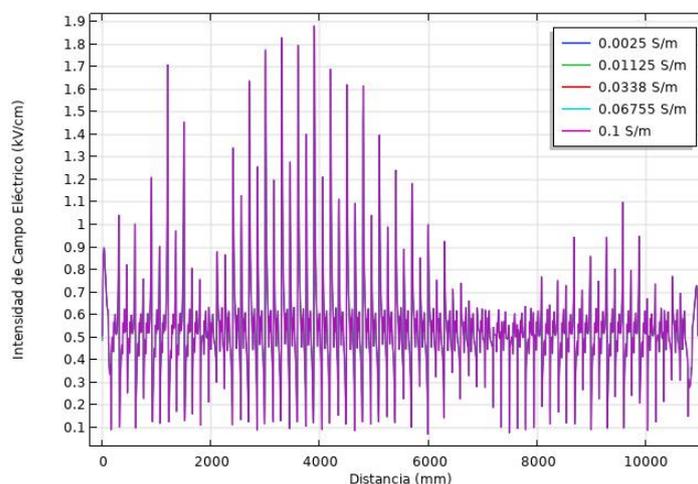


Fig. 4.43 \vec{E} sobre la capa de contaminante
(Fuente: Elaboración propia)

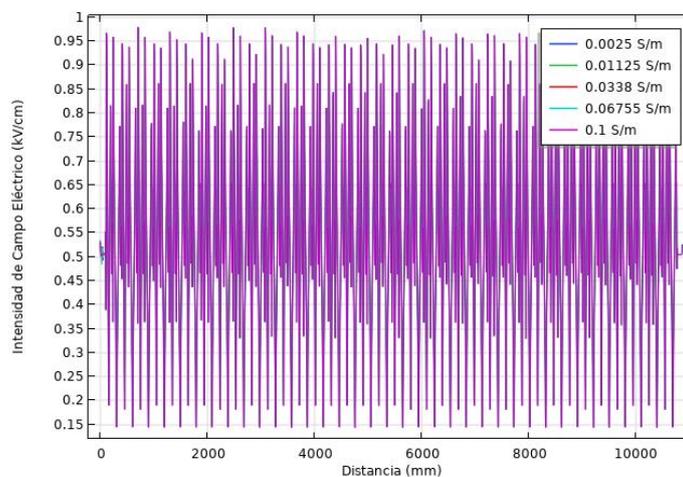


Fig. 4.44 \vec{E} sobre el material polimérico
(Fuente: Elaboración propia)

Es importante resaltar que los elevados valores de campo eléctrico en la Fig. 4.43 y Fig. 4.44 se presentan en las puntas de las aletas, a diferencia de los resultados de las Fig. 4.9, Fig. 4.17, Fig. 4.18 en condición seca y de lluvia, donde los valores picos de campo eléctrico se encontraban en el tallo del aislador.

4.7 Resultados

El resultado de la aplicación de la metodología es una disposición geométrica mejorada. En esta sección se presenta un consolidado de resultados y su grado de eficiencia, el cual es cuantificado con la ayuda de indicadores.

4.7.1 Geometría mejorada

Una vez ejecutado el barrido paramétrico los tipos de anillo A2 y A3 en el escenario seco y de lluvia, se procede a analizar la información usando los criterios de la sección 3.1.5, con lo cual se obtiene la mejor configuración en un escenario específico (sección 4.6). Esta configuración puede aplicarse a otros escenarios, a fin de comprobar su eficiencia.

La TABLA N° 4.13 presenta el grado de eficiencia de la aplicación de las nuevas dimensiones obtenidas de la metodología sobre la configuración inicial de condición seca con anillos.

TABLA N° 4.13 Grado de eficiencia de nuevas dimensiones sobre entorno inicial
(Fuente: Elaboración propia)

Aplicación sobre entorno de condición seca con anillos	Variaciones				Parámetro característico		Indicadores		
	Tipo de anillo	Δr	ΔR	ΔH	E_p (kV/cm)	X_p (mm)	kl	kp	kc
Configuración inicial	A2	0	0	0	3.418	407	-	-	-
	A3	0	0	0					
Configuración como resultado del barrido paramétrico en condición seca	A2	-10	50	75	2.385	1128	0.302	0.639	19.3%
	A3	12	60	240					
Configuración como resultado del barrido paramétrico en condición de lluvia	A2	-10	50	50	2.240	1891	0.345	0.785	27.1%
	A3	0	60	480					

La TABLA N° 4.14 muestra el resultado de aplicar las variaciones halladas en la TABLA N° 4.13, para condiciones de lluvia, sobre las dimensiones iniciales.

TABLA N° 4.14 Disposición geométrica mejorada según metodología aplicada
(Fuente: Elaboración propia)

Anillo	r (mm)	R (mm)	H (mm)
A2	15	200	274
A3	30	360	630

Las Fig. 4.45, Fig. 4.46 y Fig. 4.47 muestran el efecto de la aplicación de estos nuevos desplazamientos en el escenario inicial de condición seca con anillos.

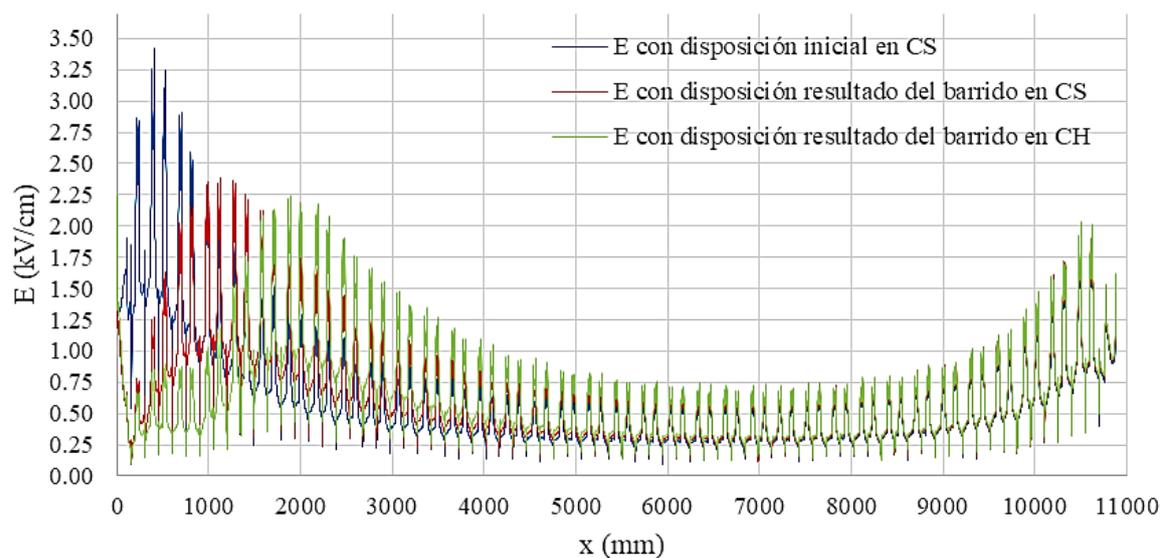


Fig. 4.45 Curvas características de nuevas disposiciones sobre entorno inicial de condición seca
(Fuente: Elaboración propia)

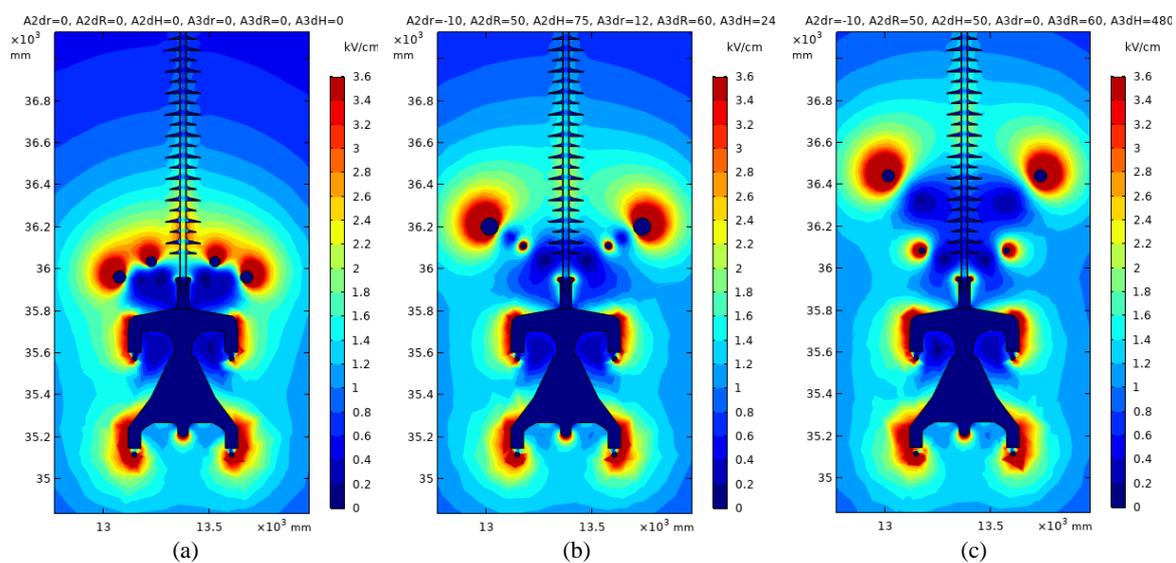


Fig. 4.46 Distribución del E con configuración de anillos (a) inicial, (b) de barrido en condición seca, (c) de barrido en condición de lluvia
(Fuente: Elaboración propia)

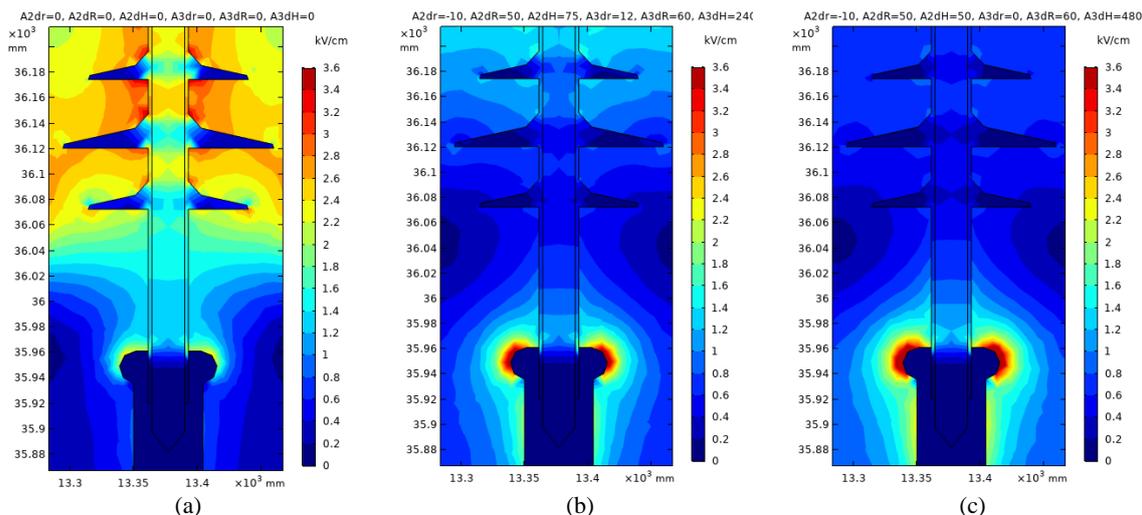


Fig. 4.47 Distribución del E en punto crítico, con configuración de anillos (a) inicial, (b) de barrido en condición seca, (c) de barrido en condición de lluvia
(Fuente: Elaboración propia)

4.7.2 Información complementaria

- En las curvas de campo eléctrico los picos de máximos relativos corresponden a la base de cada aleta, mientras que los mínimos relativos corresponden a las puntas de las aletas, lo cual puede apreciarse en la Fig. 4.48. Señalar esto es importante porque sugiere que bajo condiciones extremas las bases de las aletas, sobre todo la 3ra y 4ta aleta, sufrirán desgaste electroquímico (envejecimiento).

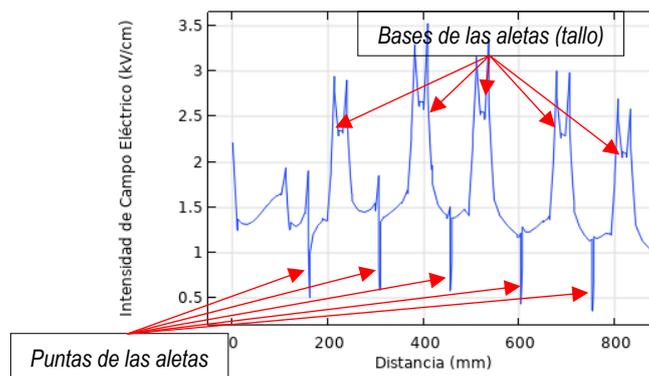


Fig. 4.48 Identificación de aletas en perfiles de campo eléctrico
(Fuente: Elaboración propia)

- La naturaleza discreta e irregular de las gotas de agua incrementa el campo eléctrico alrededor de la frontera gota-goma de silicona-aire. En el caso sin anillos las simulaciones muestran valores pico de hasta 26 kV/cm. En el caso con anillos las simulaciones muestran valores pico de hasta 9 kV/cm.
- Con respecto a los accesorios de corrección y el impacto del campo eléctrico, la Fig. 4.49 muestra claramente que la zona de los anillos que sufre mayor estrés eléctrico es la que se encuentra en

el plano $Y=0$.

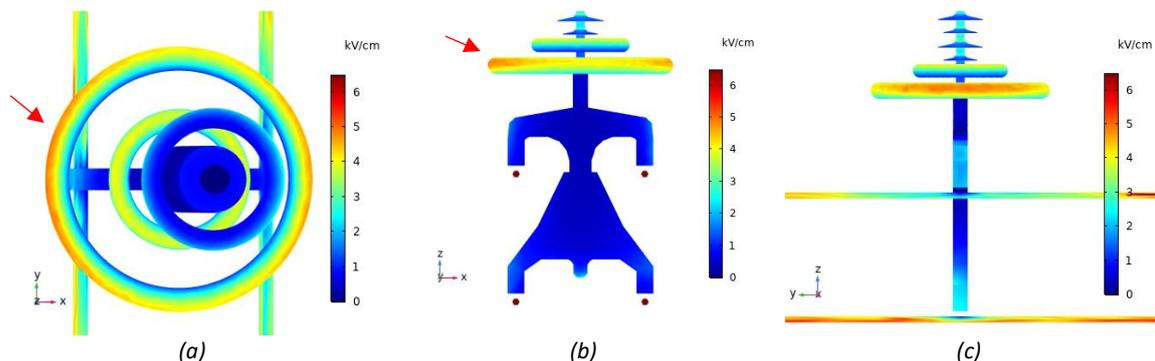


Fig. 4.49 Campo eléctrico sobre anillos, vistas (a) xy, (b) xz y (c) yz
(Fuente: Elaboración propia)

- Al contrastar el diámetro de los accesorios instalados en la L-5033, lo recomendado por el catálogo de *McLean Power Systems* y los resultados obtenidos en el presente trabajo, solo el diámetro del anillo A2 guarda relación con lo recomendado por el fabricante. Esto debido a que cada instalación tiene características únicas y. El detalle se muestra en la TABLA N° 4.15.

TABLA N° 4.15 Comparación entre diámetros de L-5033, fabricante y resultados de simulación
(Fuente: Elaboración propia)

Descripción	Cód. Anillo	Diámetro instalado en L-5033		Diámetro según McLean Power Systems		Diámetro según resultados usando Comsol		Variación respecto a L-5033	Variación respecto a catalogo
		in	mm	in	mm	in	mm		
Anillo anti corona en lado AT	A2	11.8	300	17	432	15.7	400	+33.3%	-7.4%
Anillo de distribución de campo en lado AT	A3	23.6	600	-	-	28.3	720	+20.0%	-

- En un entorno sin anillos, los valores máximos serían de 11.832 kV/cm en condición seca, 26.085 kV/cm en condición de lluvia y 5.47 kV/cm en condición de contaminación.
- Al aplicarse accesorios correctores en el escenario de condición seca el valor máximo del campo eléctrico resulta 3.536 kV/cm reduciéndose un 70.11%.

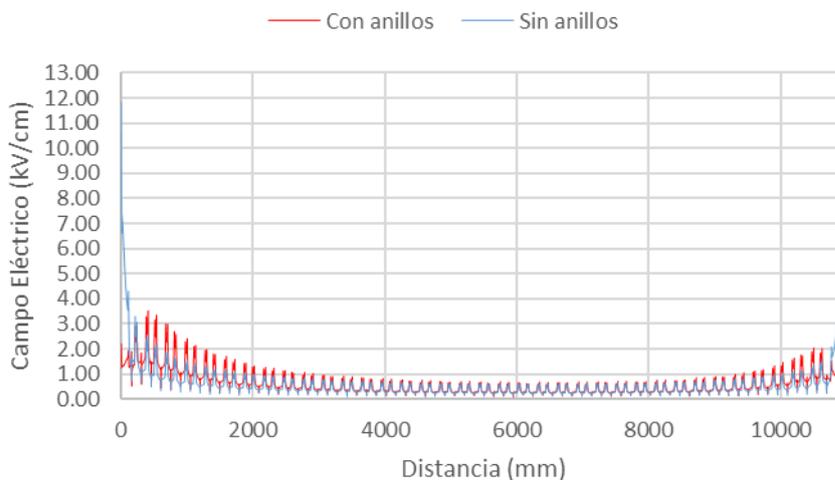


Fig. 4.50 Campo eléctrico en condición seca con y sin anillos
(Fuente: Elaboración propia)

- Al aplicarse accesorios correctores en el escenario de condición de contaminación, evaluándose el campo eléctrico sobre la capa contaminante con $\sigma=0.06755$ S/m, el valor máximo del campo eléctrico resulta 3.51248 kV/cm, reduciéndose un 35.831%. Cabe mencionar que los resultados de la simulación para los 5 niveles de contaminación son similares, además puede notarse que el valor del campo eléctrico sobre la superficie del material polimérico es bajo, siendo en promedio 1 kV/cm.
- Si bien no se realizó un barrido paramétrico para el escenario de condición de contaminación, si se aplicó la geometría mejorada (Fig. 4.51 y Fig. 4.52) obteniéndose un E_p de 1.9164 kV/cm sobre la capa contaminante (reducción del 43.8%) y un E_p de 1.0482 kV/cm sobre la superficie del aislador (incremento del 7.16%).

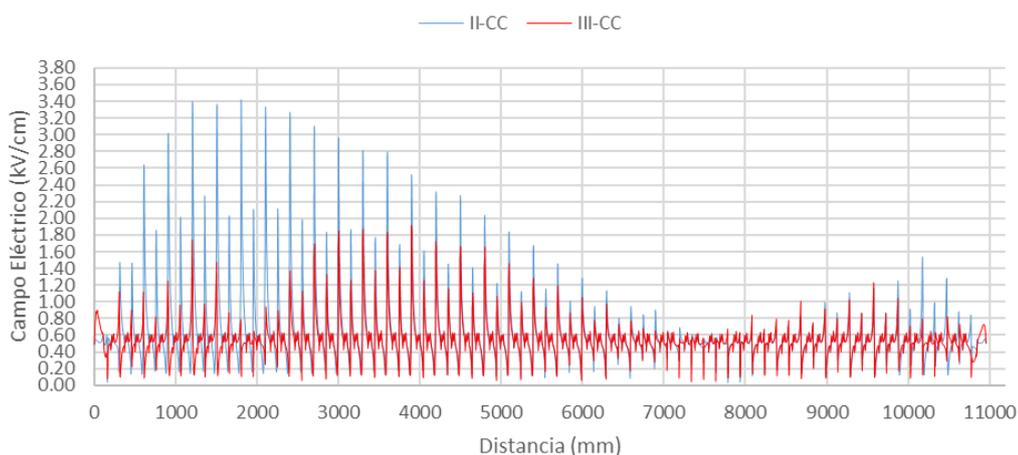


Fig. 4.51 Aplicación de geometría mejorada en escenario contaminado – campo eléctrico sobre capa contaminada
(Fuente: Elaboración propia)

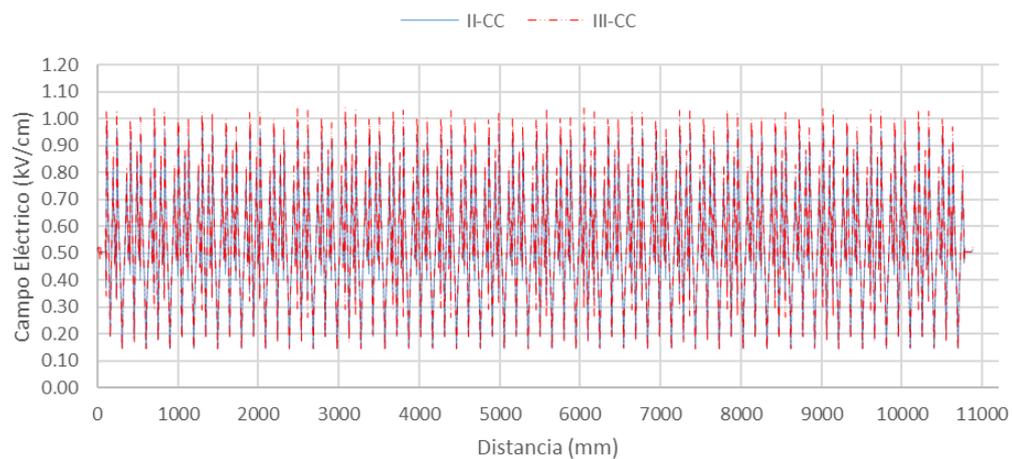


Fig. 4.52 Aplicación de geometría mejorada en escenario contaminado – campo eléctrico sobre aislador
(Fuente: Elaboración propia)

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el capítulo anterior se presentó la aplicación de la metodología, donde se explica el procedimiento para el dimensionamiento de anillos correctores, mediante la ejecución de simulaciones en un entorno virtual, obteniéndose primero el campo eléctrico sobre la superficie del aislador poliméricos sin anillos, luego considerándolos y finalmente ejecutando la variación geométrica de estos.

Se aplicó la técnica de barrido paramétrico al escenario seco y de lluvia. El modelo del escenario contaminado demostró no ser susceptible a cambios por aplicación de un barrido paramétrico.

A continuación, se presenta el análisis y discusión de los objetivos específicos alcanzados.

5.1 Análisis de resultados

5.1.1 Influencia de la metodología en dimensionamiento de anillos correctores sobre la limitación del máximo valor del campo eléctrico en aisladores poliméricos

La limitación del máximo valor del campo eléctrico es cuantificada con la ayuda del indicador “kl”. La aplicación de la metodología influye positivamente en la limitación del máximo valor del campo eléctrico sobre el aislador. Se logra mejorar un 34.5% la limitación del máximo valor del campo eléctrico sobre el aislador al utilizar las dimensiones de los resultados del barrido paramétrico del segundo escenario (de lluvia). Mientras que se logra una mejora del 30.2% al aplicar las dimensiones obtenidas del barrido paramétrico del primer escenario (seco).

TABLA N° 5.1 Eficiencia en la limitación del máximo valor del campo eléctrico

Modelos geométricos	Campo eléctrico máximo E_p (kV/cm)	Factor de reducción del valor pico (k_l)
Entorno seco	3.418	-
Entorno seco modificado	2.385	0.302
Entorno de lluvia modificado	2.240	0.345

Entorno	Factor reducción del valor pico (k_l)
Entorno seco modificado	0.302
Entorno lluvia modificado	0.345

5.1.2 Influencia de la metodología en dimensionamiento de anillos correctores sobre el alivio del punto crítico en aisladores poliméricos

El alivio del punto crítico es cuantificado con la ayuda del indicador “ k_p ”. La aplicación de la metodología influye positivamente en el alivio del punto crítico del aislador. Se logra mejorar un 78.5% el alivio del punto crítico del aislador al utilizar las dimensiones de los resultados del barrido paramétrico del segundo escenario (de lluvia). Mientras que se logra una mejora del 63.9% al aplicar las dimensiones obtenidas del barrido paramétrico del primer escenario (seco).

TABLA N° 5.2 Eficiencia en el alivio del punto crítico

Modelos geométricos	Localización del campo eléctrico máximo X_p (mm)	Factor de alejamiento del punto crítico (k_p)
Entorno seco	407	-
Entorno seco modificado	1128	0.639
Entorno de lluvia modificado	1891	0.785

Entorno	Factor alejamiento del punto crítico (k_p)
Entorno seco modificado	0.639
Entorno lluvia modificado	0.785

5.1.3 Influencia de la metodología en dimensionamiento de anillos correctores sobre la selección de la mejor configuración de anillos correctores

La selección de la mejor configuración de anillos correctores queda cuantificada con la ayuda del indicador factor de corrección “ k_c ”. La aplicación de la metodología influye positivamente en la selección de la mejor configuración de anillos correctores. Se logra un índice de 27.1% favorable en

la selección, donde las dimensiones de los resultados del barrido paramétrico del segundo escenario (de lluvia) son elegidas. Mientras que se logra un índice del 19.3% al aplicar las dimensiones obtenidas del barrido paramétrico del primer escenario (seco).

TABLA N° 5.3 Eficiencia en la selección de anillos correctores

Modelos geométricos	Factor de reducción del valor pico (kl)	Factor de alejamiento del punto crítico (kp)	Factor de corrección (kc)
Entorno seco	-	-	-
Entorno seco modificado	0.302	0.639	0.193
Entorno de lluvia modificado	0.345	0.785	0.271

Eficiencia en la selección de anillos correctores

Scenario	Efficiency (%)
Entorno seco modificado	19.3%
Entorno lluvia modificado	27.1%

■ kc - Factor de corrección

CONCLUSIONES

- En relación a la limitación del estrés eléctrico sobre el aislador, se obtuvo un mejor resultado con las dimensiones geométricas del escenario con lluvia, con lo cual se logró disminuir el estrés eléctrico un 34.5%. El valor de E_p se redujo de 3.418 kV/cm a 2.240 kV/cm.
- Respecto al alivio del punto crítico, se obtuvo un mejor resultado con las dimensiones geométricas del escenario con lluvia, con lo cual se logró incrementar el alivio del punto crítico un 78.5%. El valor de X_p aumento de 40.7 cm a 189.1 cm.
- En la selección de la mejor configuración de anillos correctores, se obtuvo un mejor resultado con las dimensiones geométricas del escenario con lluvia, con lo cual se logró mejorar el desempeño del campo eléctrico en un 27.1%.

RECOMENDACIONES

- En el barrido paramétrico sobre el escenario de lluvia, se efectuaron 36 combinaciones para el anillo anti corona (tipo A2) y 54 combinaciones para el anillo de distribución de campo (tipo A3). De esto se infiere que existe una combinación con la cual se obtiene un factor de corrección k_c (factor de corrección del campo eléctrico para cierta curva característica) más alto, la cual puede ser hallada usando métodos metaheurísticos.
- Los resultados mostraron que, en el modelo utilizado, la aplicación de una capa de contaminación ($338 \mu\text{S}/\text{cm}$) continua sobre la superficie del aislador no incrementa el campo eléctrico. Sin embargo, las corrientes de fuga si se incrementan. Se recomienda el uso de herramientas computacionales para el estudio de las corrientes de fuga considerando la naturaleza resistivo - capacitiva de la superficie del contaminante.
- Se recomienda como tema de investigación la coordinación entre la geometría de los anillos correctores y la geometría del terminal de alta tensión, para obtener una distribución de campo eléctrico más uniforme.

BIBLIOGRAFÍA

- Al Dhalaan, S. M., & Elhirbawy, M. A. (2003a). Investigation on the Characteristics of a String of Insulator due to the Effect of Dirt. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 3, 915–920.
<https://doi.org/10.1109/tdc.2003.1335059>
- Al Dhalaan, S. M., & Elhirbawy, M. A. (2003b). Simulation of Voltage Distribution Calculation Methods over a String of Suspension Insulators. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 3, 909–914.
<https://doi.org/10.1109/tdc.2003.1335058>
- Arshad, Nekahi, A., & Mcmeekin, S. G. (2015). Effect of pollution severity on electric field distribution along a polymeric insulator. *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, 612–615.
- Barros, R. M. R., Da Costa, E. G., Ferreira, T. V., Araujo, J. F., & Andrade, F. L. M. (2017). A new approach for optimal design of corona ring. *2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, IPMHVC 2016*, 684–687.
<https://doi.org/10.1109/IPMHVC.2016.8012894>
- CEI/IEC. (1997). CEI/IEC 60437:1997 Radio interference test on high-voltage insulators. *CEI/IEC*, 1, 1–25.
- Chrakravorti, S. (2015). *Electric Field Analysis* (1st ed.). Taylor & Francis Group, LLC.
- CIGRE. (2005). Use of corona rings to control the electrical field along transmission line composite insulators. *CIGRE Technical Brochure 284*.
- CIGRE. (2017). *Green Book: Overhead Lines*.
- Doshi, T., Gorur, R. S., & Hunt, J. (2011). Electric field computation of composite line insulators up to 1200 kV AC. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18(3), 861–867. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.5931075>

- Doshi, Tanushri. (2010). Performance Analysis of Composite Insulators up to 1200kV AC using Electric Field Calculations. *ARIZONA STATE UNIVERSITY, November*, 98.
- El-Refaie, E. S. M., Abd Elrahman, M. K., & Mohamed, M. K. (2016). Electric field distribution of optimized composite insulator profiles under different pollution conditions. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1349–1356. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.08.012>
- Guan, Z., Wang, L., Yang, B., Liang, X., & Li, Z. (2005). Electric field analysis of water drop corona. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2 I), 964–969. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.837672>
- Hassanvand, A., Illias, H. A., Mokhlis, H., & Bakar, A. H. A. (2014). Effects of corona ring dimensions on the electric field distribution on 132 kV glass insulator. *Proceedings of the 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO 2014, March*, 248–251. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2014.6814434>
- IEC. (2020). *IEC/TS 60815-1 Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions- Part 1*.
- International Electrotechnical Commission. (2017). IEC TS 62788-2 Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces. *IEC, 2003*, 1–92.
- Kalimurugan, M. S., & Maheswari, R. V. (2015). Investigation of electric field distribution on A C composite insulator using corona ring. *ICIIECS 2015 - 2015 IEEE International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems*, 0–5. <https://doi.org/10.1109/ICIIECS.2015.7192866>
- Lings, R., Chartier, V., & Maruvada, P. S. (2005). Overview of transmission lines above 700 kV. *Proceedings of the Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa, 2005(July)*, 33–43. <https://doi.org/10.1109/pesaf.2005.1611782>
- Loardo, I. M., & Energía, R. D. P. S. . (2010). Experiencia en el uso de aisladores poliméricos en zonas de alta contaminación. *Revista CIER N° 57, No57*, 51–54.
- Looms, J. S. T., & Chapman, M. C. (1991). Insulators for High Voltages. In *IEEE Power Engineering Review* (Vol. 11, Issue 6). <https://doi.org/10.1109/MPER.1991.90686>
- Lopes, D. S., & Becerra, J. M. B. (2015). Potential Distribution Along a 500kV Polymer Insulator in Presence of a Pollution Layer. *Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Curitiba*.
- M'Hamdi, B., Tegar, M., & Mekhaldi, A. (2016). Optimal design of corona ring on HV composite insulator using PSO approach with dynamic population size. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(2), 1048–1057. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005383>

- MacLean Power Systems. (2020). *Transmission product catalog* (p. 248).
- Mukherjee, P. K., Ahmed, A., & Singer, H. (1999). Electric field distortion caused by asymmetric pollution on insulator surfaces. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 6(2), 175–180. <https://doi.org/10.1109/94.765908>
- Murawwi, E. Al, & El-Hag, A. (2011). Corona ring design for a 400 kV non-ceramic insulator. *2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS 2011*. <https://doi.org/10.1109/EPECS.2011.6126818>
- Murawwi, E. Al, Mohammed, A., Alip, Z., & Ei-Hag, A. (2013). Optimization of corona ring design for a 400KV non-ceramic insulator. *2013 IEEE Electrical Insulation Conference, EIC 2013, June*, 370–373. <https://doi.org/10.1109/EIC.2013.6554269>
- Nallim, F. E., Angelini, J. M. G., Rossi, J. A. D., Cpqd, J. A. P., Góis, N. C., & Coelba, J. A. S. B. (2003). Sensor para verificação de degradação em isoladores poliméricos de linhas de transmissão. *II Congresso de Inovação Tecnológica Em Energia Elétrica*, 579–584.
- Nicolopoulou, E. P., Gralista, E. N., Kontargyri, V. T., Gonos, I. F., Stathopoulos, I. a, & Campus, Z. (2011). Electric Field and Voltage Distribution Around Composite Insulators. *XVII International Symposium on High Voltage Engineering, August(August)*, 22–26.
- Niedospial, E. (2012). Design and application of corona and grading rings for composite insulators. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/TDC.2012.6281712>
- Osinermin. (2017). *Proyectos relevantes de generación y transmisión de energía eléctrica en construcción - Marzo 2017* (p. 21).
- Osinermin. (2020). *LÍNEA DE TRANSMISIÓN 500 KV CHILCA – LA PLANICIE - ZAPALLAL (189,2 km)* (p. 1). División de Supervisión de Electricidad.
- Papailiou, K., & Schmuck, F. (2013). *Silicone composite insulators*. Springer.
- Phillips, A. J., Childs, D. J., & Schneider, H. M. (1999). Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(3), 1081–1086. <https://doi.org/10.1109/61.772357>
- Phillips, A., Kuffel, J., Baker, A., Burnham, J., Carreira, A., Cherney, E., Chisholm, W., Farzaneh, M., Gemignani, R., Gillespie, A., Grisham, T., Hill, R., Saha, T., Vancia, B., & Yu, J. (2008). Electric fields on AC composite transmission line insulators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(2), 823–830. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.911127>
- Ruchansky, B. (2013). *Integración eléctrica en América Latina: Antecedentes, realidades y*

- caminos por recorrer. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Uckol, H. I., Karaca, B., & Ilhan, S. (2020). DC and AC electric field analysis and experimental verification of a silicone rubber insulator. *Springer Nature 2020*, 102(1), 503–514.
<https://doi.org/10.1007/s00202-020-00954-3>
- Xu, Q. Y., & Zhu, Y. S. (2011). Research on corona ring setting and structure optimization of composite insulator based on neural network. *2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce, AIMSEC 2011 - Proceedings*, 4224–4227. <https://doi.org/10.1109/AIMSEC.2011.6010101>
- Yang, Q., Wang, R., Sima, W., Jiang, C., Lan, X., & Zahn, M. (2012). Electrical circuit flashover model of polluted insulators under ac voltage based on the arc root voltage gradient criterion. *Energies*, 5(3), 752–769. <https://doi.org/10.3390/en5030752>
- Yanque Montufar, J. (1972). La distribución de potencial y la corriente de fuga en las cadenas de aisladores de servicio. *Problemmes Electriques Des Centrales et Reseaux*.
- Yanque Montufar, J. (2020). *Guia Protocolo - Distribución de la tensión en cadenas de aisladores de líneas eléctricas de AT y EAT* (pp. 1–17).
- Zhang, Y., Han, Y., Yang, J., Ruan, Y., Liao, Y., Liu, G., Jia, L., Li, L., & Wang, F. (2019). Study on the Formation of the Electric Field around Three-phase Insulators in 110kV Transmission Tower and Its Influence on Flashover Voltage. *2018 International Conference on Power System Technology, POWERCON 2018 - Proceedings*, 510640(201804270000465), 3521–3527. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2018.8602230>
- Zhao, T., & Comber, M. (2000). Calculation of electric field and potential distribution along nonceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(1), 313–318.

MATRIZ DE CONSISTENCIA

DISEÑO Y APLICACIÓN DE METODOLOGÍA EN DIMENSIONAMIENTO DE ANILLOS CORRECTORES, REDUCIENDO EL ESTRÉS ELÉCTRICO EN AISLADORES POLIMÉRICOS						
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	OPERACIONALIZACIÓN			ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	VARIABLES	Dimensiones	Indicadores	
¿De qué manera el diseño y aplicación de una metodología en dimensionamiento de anillos correctores permite limitar el máximo valor del campo eléctrico, aliviar el punto crítico y seleccionar la mejor configuración de anillos correctores, en aisladores poliméricos?	Establecer en qué medida el diseño y aplicación de una metodología en dimensionamiento de anillos correctores consigue limitar el máximo valor del campo eléctrico, aliviar el punto crítico y seleccionar la mejor configuración de anillos correctores, en aisladores poliméricos.	El diseño y aplicación de una metodología en dimensionamiento de anillos correctores logra limitar el máximo valor del campo eléctrico, aliviar el punto crítico y seleccionar la mejor configuración de anillos correctores, en aisladores poliméricos	<u>Variable independiente:</u> X: Metodología en dimensionamiento de anillos correctores.	X1: Geometría del modelo	Dimensiones y ubicación de los anillos (m)	a) <u>Nivel de investigación:</u> Aplicada b) <u>Enfoque:</u> Cuantitativo. c) <u>Método:</u> Deductivo. d) <u>Técnicas:</u> Simulación computacional. e) <u>Instrumentos:</u> -Programas de simulación basados en elementos finitos (Comsol) -Hojas de cálculo
				X2: Grado de discretización de los elementos del modelo	Número de elementos discretizados en dominios "Nd" (Und.).	
				X3: Herramienta computacional seleccionada.	Tiempo de ejecución del mallado "Ts" (s).	
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas				
a) ¿De qué manera el diseño y aplicación de una metodología en dimensionamiento de anillos correctores permite limitar el máximo valor del campo eléctrico en aisladores poliméricos?	a) Estudiar de qué manera el diseño y aplicación de una metodología en dimensionamiento de anillos correctores influye en la limitación del máximo valor del campo eléctrico en aisladores poliméricos.	a) El diseño y aplicación de una metodología en dimensionamiento de anillos correctores logra limitar el máximo valor del campo eléctrico en aisladores poliméricos.	<u>Variable dependiente:</u> Y: Reducción del estrés eléctrico en aisladores poliméricos.	Y1: Limitación del máximo valor del campo eléctrico en aisladores poliméricos.	-Factor de reducción del valor pico "kl (%)".	
b) ¿De qué manera el diseño y aplicación de una metodología de dimensionamiento de anillos correctores posibilita el alivio del punto crítico en aisladores poliméricos?	b) Establecer de qué manera con el diseño y aplicación de una metodología de dimensionamiento de anillos correctores se logra aliviar el punto crítico en aisladores poliméricos.	b) El diseño y aplicación de una metodología de dimensionamiento de anillos correctores consigue aliviar el punto crítico en aisladores poliméricos.		Y2: Alivio del punto crítico en aisladores poliméricos.	-Factor de alejamiento del punto crítico "kp (%)".	
c) ¿De qué manera con el diseño y aplicación de una metodología de dimensionamiento de anillos correctores se logra seleccionar la mejor configuración de anillos correctores en aisladores poliméricos?	c) Analizar de qué manera con el diseño y aplicación de una metodología de dimensionamiento de anillos correctores se alcanza la selección de la mejor configuración de anillos correctores en aisladores poliméricos.	c) El diseño y aplicación de una metodología de dimensionamiento de anillos correctores logra seleccionar la mejor configuración de anillos correctores en aisladores poliméricos.		Y3: Selección de la mejor configuración de anillos correctores en aisladores poliméricos.	-Factor de corrección "kc (%)".	

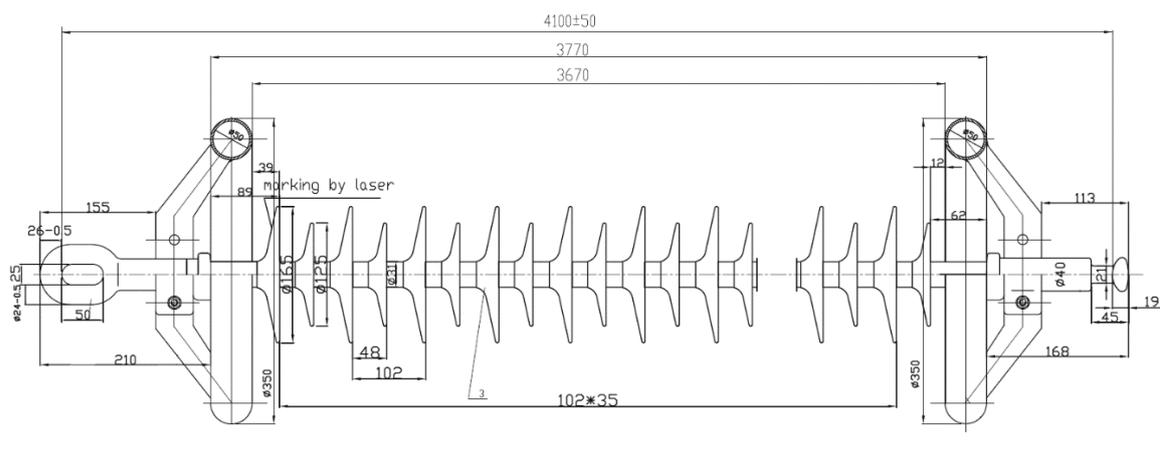
ANEXOS

ANEXO A.- Características técnicas

Características técnicas de la línea MAMO

Línea de transmisión 500 kV Colcabamba – Poroma, Poroma – Yarabamba y Yarabamba – Montalvo	
Nivel de tensión	500 kV: Tramo Colcabamba – Poroma, Tramo Poroma – Yarabamba, Tramo Yarabamba – Montalvo. 220 kV: Enlace Colcabamba – Campo Armiño Enlace Yarabamba – Socabaya
Nivel de contaminación	Alto (31 mm/kV): Tramo Poroma – Yarabamba y últimos 17 km del Tramo Colcabamba – Poroma. Medio (20 mm/kV): Tramo Colcabamba – Poroma Tramo Yarabamba – Montalvo Enlace Colcabamba– Campo Armiño Enlace Yarabamba – Socabaya
Aisladores	Aisladores poliméricos
Tipo de Estructura	Estructuras en celosía de acero galvanizado para: Circuito sencillo horizontal a 500 kV. Circuito sencillo triangular a 500 kV. Circuito sencillo triangular a 220 kV. Doble circuito vertical a 220 kV.
Puestas a Tierra	Se definirá el diseño dependiendo de la resistividad del terreno.

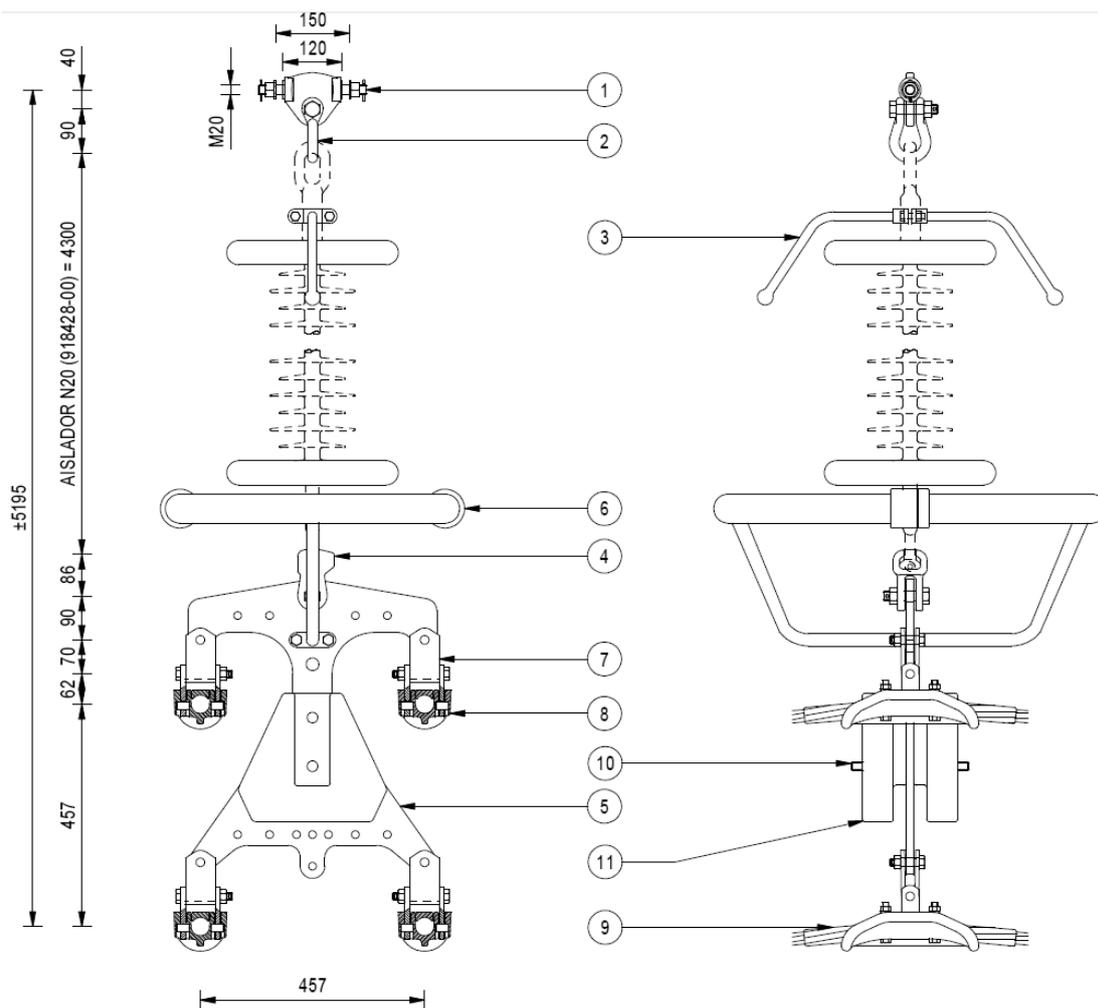
Los aisladores poliméricos son el elemento clave de esta investigación. Como caso base se propone analizar un aislador polimérico de 500 kV instalado en una torre de suspensión; las dimensiones fueron extraídas del catálogo de “Zibo Taiguang Electric Equipment Factory” (código 918537-00). La cadena de suspensión simple también se implementa y se extrajo del catálogo de “Dervaux sa” (código 7J14-348E).



Plano Aislador

Componentes del Aislador

N°	Código	Descripción	Cantidad	Materiales	Marca
1	916569-01	Terminal ojo	1	Acero forjado	H.D.G
2	500-11-00	Anillo anti corona	2	Acero forjado	H.D.G
3	918537-01	Aislamiento	1	Goma de silicona y ECR	HTV Grey
4	117501-09	Bola IEC120-20	1	Acero Forjado	H.D.G



Cadena de suspensión estabilizadora sencilla

Elementos en cadena de suspensión

11	2	CONTRAPESO	G25PQEG	FUNDICION GALVANIZADA	-
10	2	BARRA DE ACOPLAMIENTO	TG18-240RW	ACERO GALVANIZADO	-
9	4	VARILLAS	AARE2582-2000ZPB	ALEACION ALUMINIO	-
8	4	GRAPA DE SUSPENSION	AE2D25383BSCEG	ACERO GALVA + ALEAC ALU	130
7	4	CONECTOR	CU127060BEG	ACERO GALVANIZADO	120
6	1	ANILLO DE PROTECCION	AGD3N8LEG	ACERO GALVANIZADO	-
5	1	YUGO	PSP210QH-CCRL-ISA1EG	ACERO GALVANIZADO	210
4	1	ROTULA HORQUILLA	BS20CB21ACEG	ACERO GALVANIZADO	210
3	1	DESCARGADOR DOBLE	CCD3LJ3BIML40EG	ACERO GALVANIZADO	-
2	1	GRILLETE	501A25EG	ACERO GALVANIZADO	210
1	1	MANCAL	TT210120M20AEG	ACERO GALVANIZADO	210
Sem	Qty	Designacion	Referencia Catalogo	Materia	UTS

Especificaciones técnicas del aislador:

- Estándar: IEC61109
- Longitud de fuga mínima 11000 mm
- Distocia de arco sin anillos 3770 mm
- Distancia mínima de arco con anillos ≥ 3650 mm
- Min. espesor de cobertura de goma de silicona 5 mm
- Min. Tensión para *flashover* (Seco) 1040 kV
- Min Tensión para *flashover* (Lluvia) 880 kV
- BIL 2470 kV
- Tensión de impulso critico de *flashover* 2050 kV
- Tiro de rotura 210 kN
- Tiro de rotura (Pruebas) 105 kN
- Color Gris
- Diámetro de aleta grande 165 mm
- Diámetro de aleta pequeña 125 mm

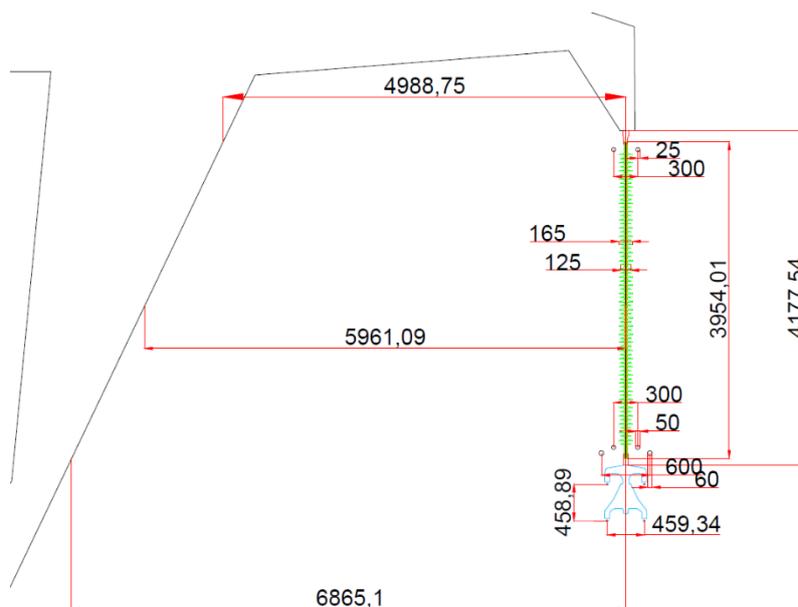
Dimensiones:

- Longitud: 4,10 m
- Longitud de fuga: 11 000 mm
- Diámetro aletas primarias: 16,50 cm
- Diámetro aletas secundarias 12,50 cm
- Número de aletas primarias: 70
- Número de aletas secundarias: 71
- Diámetro mayor de anillo anti corona: 300 mm
- Diámetro menor de anillo anti corona: 50 mm
- Diámetro mayor de anillo de distribución de campo (de protección): 600 mm
- Diámetro menor de anillo de distribución de campo (de protección): 60 mm

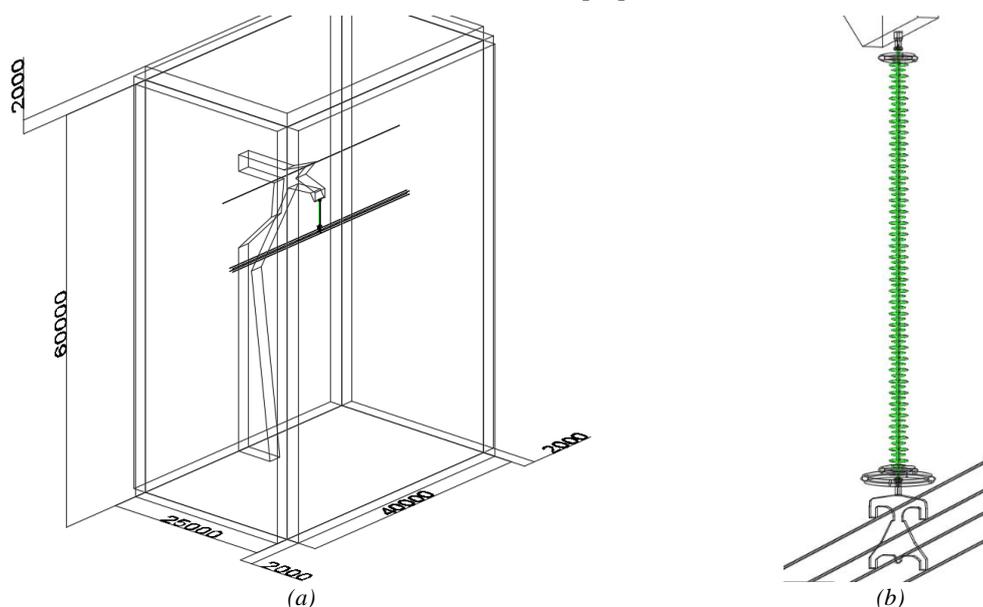
ANEXO B.- Pasos para modelamiento

1. Modelado geométrico

Fueron necesarios dibujos en 3D usando AutoCad, basado en un modelo inicial en 2D. COMSOL tiene la capacidad de importar archivos CAD o DXF. El dibujo debe tener un alto nivel de detalle, ya que cualquier imperfección originara errores durante la simulación.

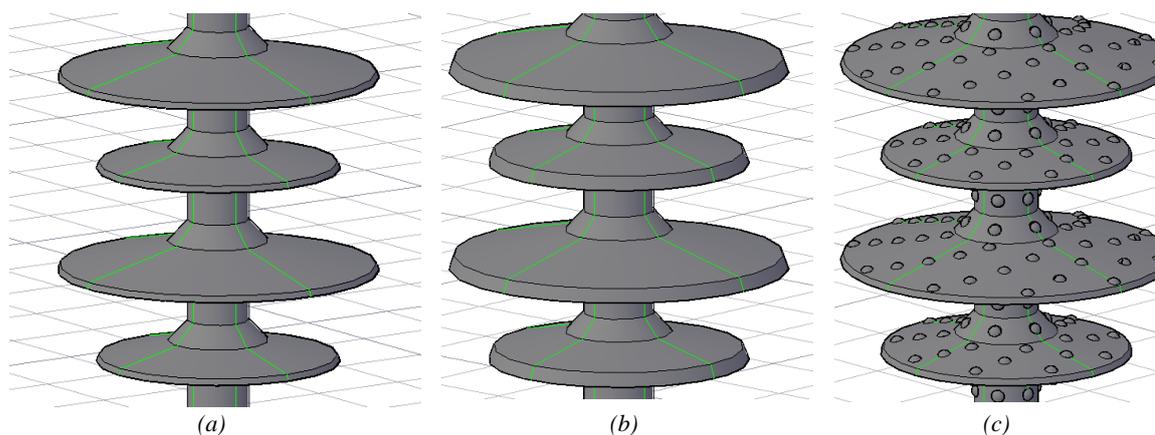


Dimensiones
(Fuente: Elaboración propia)



Modelo 3D. (a) Torre, (b) Aislador.
(Fuente: Elaboración propia)

La longitud de los conductores de fase y de guarda es de 36 m, mientras que la altura y ancho de la torre es de 43105.8285 y 2000 mm respectivamente.



Modelos en condiciones (a) Secas, (b) Con Contaminante, (c) Con gotas.
(Fuente: Elaboración propia)

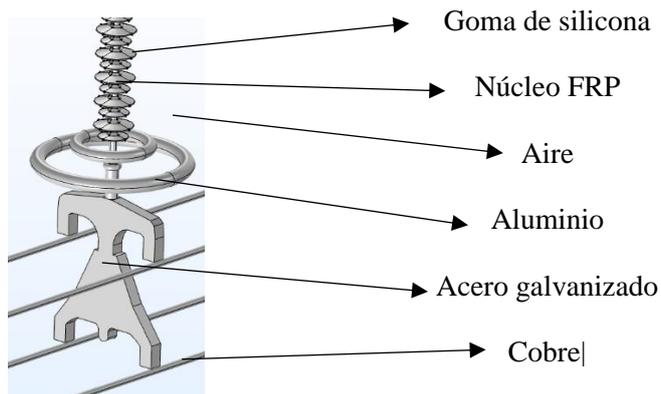
La capa contaminante tiene 2 mm de espesor, mientras que las gotas de agua tienen 6mm de diámetro y forman un ángulo de 115° con la superficie.

2. Asignación de parámetros en materiales constituyentes

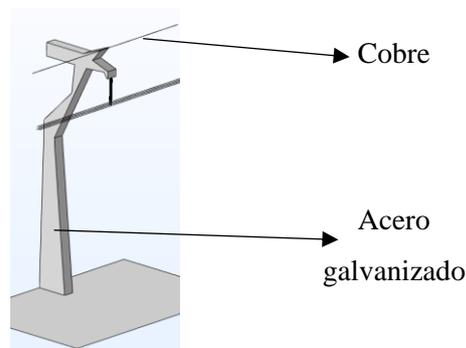
En la Tabla se asigna a cada elemento del modelo valores de permitividad relativa y conductividad eléctrica. Los valores de los parámetros de la capa de contaminación se basaron en los valores de (El-Refaie et al., 2016; IEC, 2020; Mukherjee et al., 1999).

Valores de conductividad y permitividad
Fuente: (El-Refaie et al., 2016, p. 4)

Nº	Material	Conductividad ($\sigma=S/m$)	Permitividad relativa (ϵ_r)	
1	Acero galvanizado	1.9×10^7	1	
2	Cobre	5.998×10^7	1	
3	Aluminio (Para los anillos)	3.538×10^7	1	
4	Aire	1×10^{-13}	1	
5	Goma de silicona	1×10^{-12}	4.3	
6	Núcleo FRP	1×10^{-12}	7.2	
7	Gotas de agua	5.5×10^{-6}	80 (20°C)	
8	Capa de contaminación	Muy ligero	2.5×10^{-3}	7.1
		Ligero	1.125×10^{-2}	7.1
		Medio	3.38×10^{-2}	7.1
		Severo	6.755×10^{-2}	7.1
		Muy severo	1×10^{-1}	7.1



Asignación de materiales en Aislador y ferretería
(Fuente: Elaboración propia)



Asignación de material de Estructura
(Fuente: Elaboración propia)

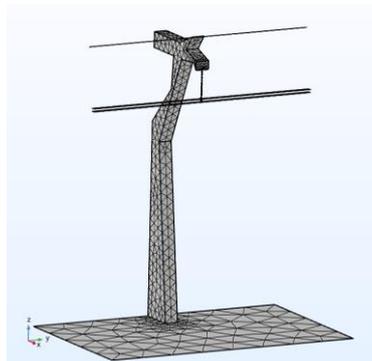
3. Mallado, dominios y condiciones de frontera

El sistema se resuelve en estado estacionario, para fines prácticos se establecen potenciales constantes; sin embargo, un estudio en el dominio del tiempo y con una Tensión Alterna es posible, sin embargo, el tiempo de simulación se incrementaría demasiado.

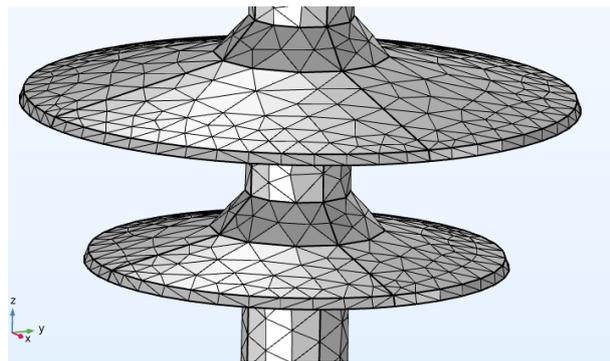
En el entorno de simulación los dominios son regiones volumétricas, y las fronteras son superficies (Dirichlet). Se asignan tensiones de fase rms $V_f = 500/\sqrt{3} \text{ kV}$ al terminal metálico AT, los conductores, anillos y el yugo; por otra parte, se asigna 0V al terminal conectado a la Torre y al cable de guarda.

De la misma forma el sistema puede analizarse usando el valor de tensión pico $=500 * \sqrt{2}/\sqrt{3} \text{ kV}$. Los dominios como aire, goma de silicona y varilla de fibra de vidrio son detectados automáticamente por el simulador el cual les asigna un valor inicial de 0V, en los cuales los potenciales tomarán los valores buscados al terminar del proceso de simulación (estado estacionario).

Ya que la simulación se basa en el MEF, dominios y fronteras son discretizados en elementos individuales tetraédricos y triangulares, formando mallas distribuidas en el espacio. La distribución, el número y la forma de los elementos de estas mallas son factores que influyen la precisión de la solución y el tiempo de procesamiento.

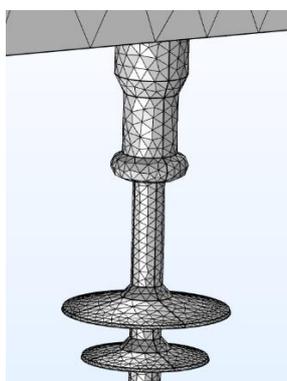


(a)

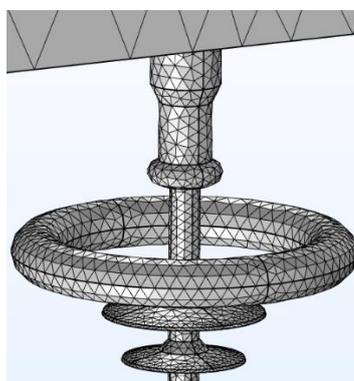


(b)

Malla en (a) torre y (b) aletas
(Fuente: Elaboración propia)

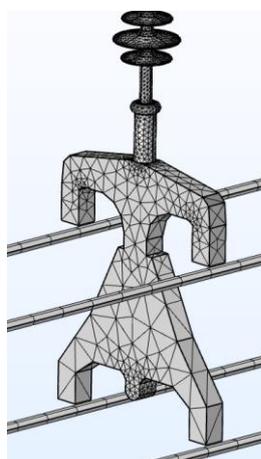


(a)

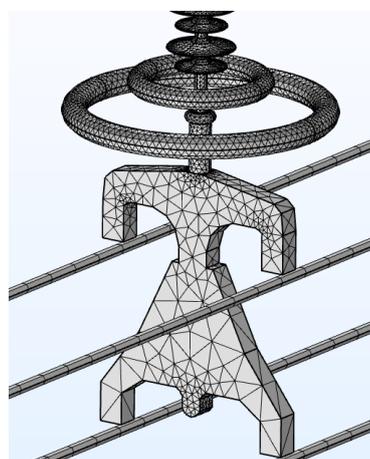


(b)

Malla en terminal a tierra. (a) Sin anillo, (b) Con anillo
(Fuente: Elaboración propia)



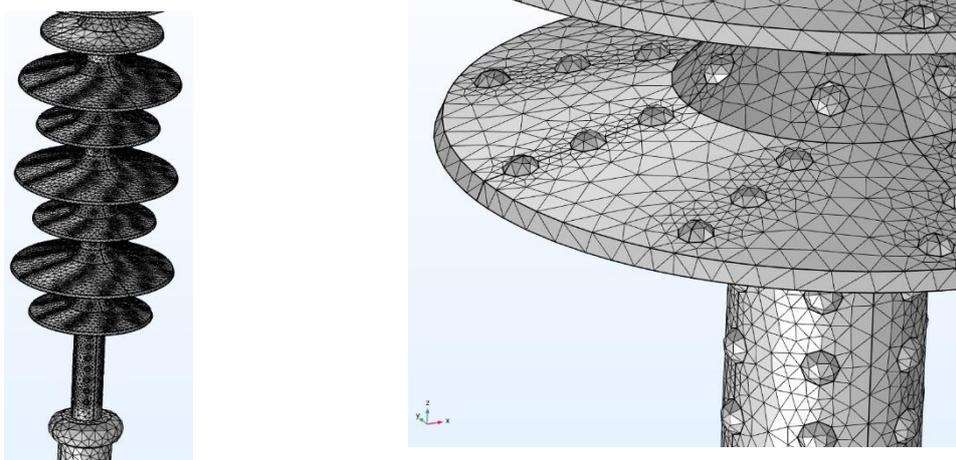
(a)



(b)

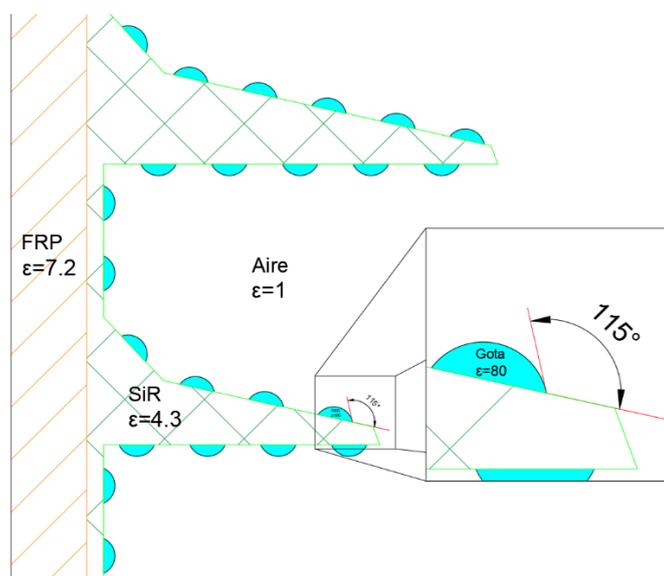
Malla en región AT. (a) Sin anillos, (b) Con anillos
(Fuente: Elaboración propia)

Al modelo inicial se añaden los elementos de dibujo necesarios para los casos que incluyen una capa de contaminación y gotas de agua, las mallas resultan como sigue:



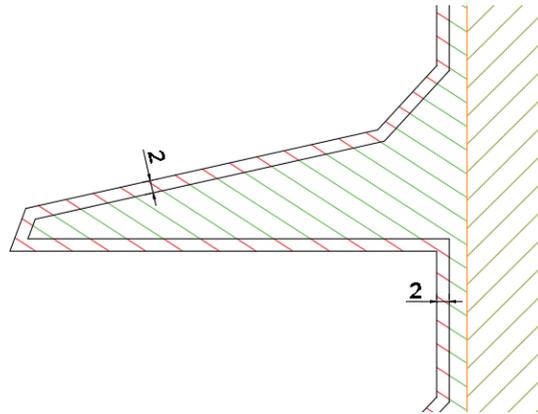
Malla en región AT. con gotas de agua
(Fuente: Elaboración propia)

Las gotas de agua se consideran solo a lo largo de la superficie del aislador. En (A. J. Phillips et al., 1999) se ha demostrado que el valor crítico del campo eléctrico para el inicio de la corona mayor en los bordes de la gota y guarda relación con el ángulo de contacto. El diámetro de las gotas de agua y la separación entre ellas se toma como 6 mm. Un material perfectamente hidrófobo forma un ángulo de contacto de 90° con la superficie, sin embargo, se considera un ángulo de contacto de 115° ya que se espera gotas alargadas ante el campo eléctrico. Se repite el proceso de dibujo al igual que en condición seca, las gotas se dibujan en el plano para luego pasarlo a un modelo 3D.

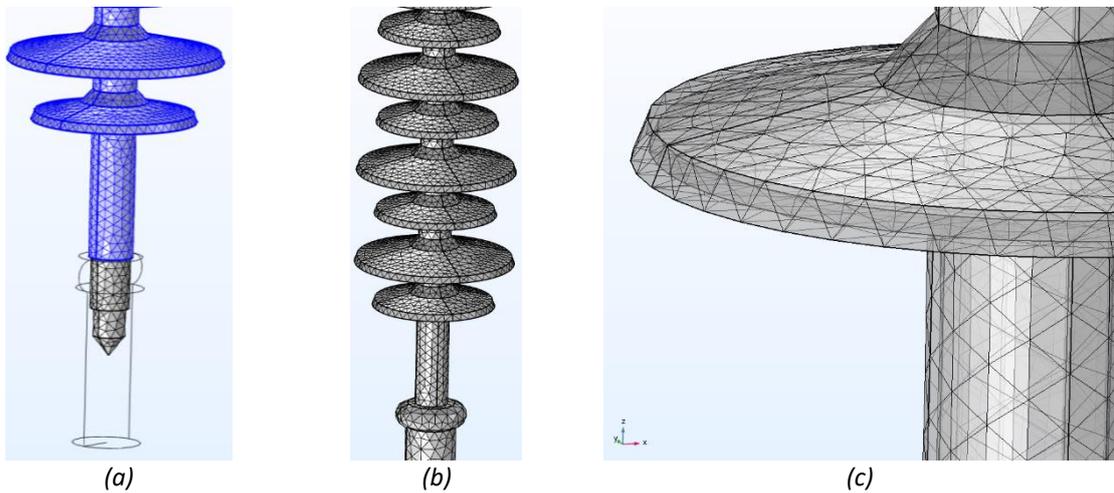


Gotas de agua sobre modelo 2D
(Fuente: Elaboración propia)

Al caso bajo condición seca se agrega una capa de contaminación de 2 mm de espesor:

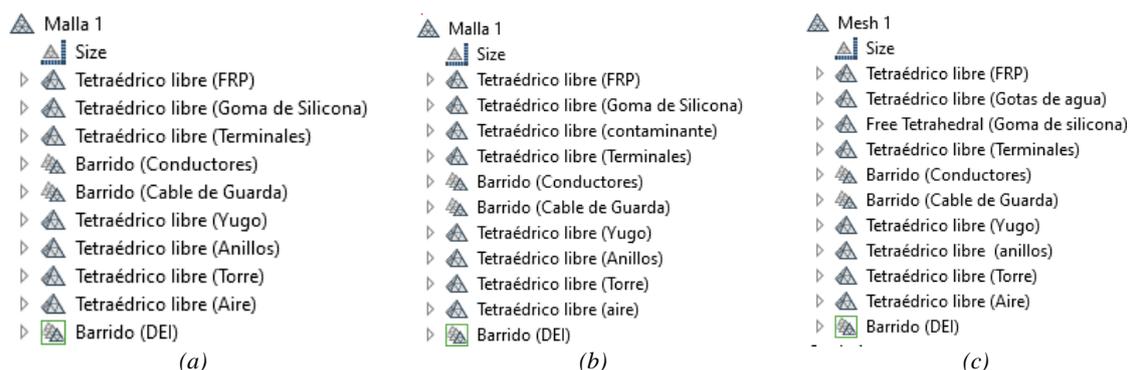


Capa de contaminación de 2 mm.
(Fuente: Elaboración propia)



Malla en región AT. con contaminación
(Fuente: Elaboración propia)

La precisión de los resultados obtenidos mejora al aumentar el número de elementos finitos. Sin embargo, esto podría causar un aumento irrazonable en el tiempo de cálculo. Por lo tanto, se debe tener un balance entre precisión y tiempo de cálculo. Para lograr esto se realizó un “mallado personalizado” donde el orden es relevante, es decir, mallando desde los más pequeños (FRP) hasta los más voluminosos (Aire).



Secuencia de mallado (a) Seco, (b) Con contaminante, (c) Con gotas

(Fuente: Elaboración propia)

Por ejemplo, para el caso en condición seca, la malla contiene 1 025 474 elementos. El tiempo de cálculo fue de $t = 4 \text{ min } 25 \text{ s}$. La manipulación de la secuencia de mallado y variación del parámetro “*Tamaño mínimo de elemento*” (entre 1 y 20) es crucial para reducir el tiempo de cálculo, ya que el modelo es “muy grande” comparado con el aislador (el número de elementos del aislador representa el 10% de todo el modelo).

Configuración del mallado – condición seca

(Fuente: Elaboración propia)

Dominio	Malla	Calidad	Tamaño máximo de elemento (mm)	Tamaño mínimo de elemento (mm)	Tasa máxima de crecimiento del elemento	Factor de curvatura	Resolución de regiones cercanas
FRP	Tetraédrico libre	Fino	500	12	1.45	0.5	0.6
Goma de Silicona	Tetraédrico libre	Muy fino	15	10	1.4	0.4	0.7
Terminales metálicos	Tetraédrico libre	Extra Fino	15	10	1.35	0.3	0.85
Conductores	Barrido	Fino	100	15	1.45	0.5	0.6
Cable de guarda	Barrido	Fino	500	15	1.45	0.5	0.6
Yugo	Tetraédrico libre	Extra Fino	500	10	1.35	0.3	0.85
Anillos	Tetraédrico libre	Fino	100	15	1.45	0.5	0.6
Torre	Tetraédrico libre	Normal	500	15	1.5	0.6	0.5
Aire	Tetraédrico libre	Fino	5000	10	1.45	0.5	0.6
DEI	Barrido	Extremadamente fino	250	20	1.3	0.2	1

Configuración del mallado – Con contaminante
(Fuente: Elaboración propia)

Dominio	Malla	Calidad	Tamaño máximo de elemento (mm)	Tamaño mínimo de elemento (mm)	Tasa máxima de crecimiento del elemento	Factor de curvatura	Resolución de regiones cercanas
FRP	Tetraédrico libre	Fino	500	12	1.45	0.5	0.6
Goma de Silicona	Tetraédrico libre	Muy Fino	15	10	1.4	0.4	0.7
Contaminante	Tetraédrico libre	Muy Fino	15	10	1.4	0.4	0.7
Terminales metálicos	Tetraédrico libre	Extra Fino	15	10	1.35	0.3	0.85
Conductores	Barrido	Fino	100	15	1.45	0.5	0.6
Cable de guarda	Barrido	Fino	400	15	1.45	0.5	0.6
Yugo	Tetraédrico libre	Extra Fino	500	10	1.35	0.3	0.85
Anillos	Tetraédrico libre	Fino	100	15	1.45	0.5	0.6
Torre	Tetraédrico libre	Normal	500	15	1.5	0.6	0.5
Aire	Tetraédrico libre	Fino	5000	5	1.45	0.5	0.6
DEI	Barrido	Extremadamente fino	250	20	1.3	0.2	1

Configuración del mallado – Con gotas
(Fuente: Elaboración propia)

Dominio	Malla	Calidad	Tamaño máximo de elemento (mm)	Tamaño mínimo de elemento (mm)	Tasa máxima de crecimiento del elemento	Factor de curvatura	Resolución de regiones cercanas
FRP	Tetraédrico libre	Fino	500	12	1.45	0.5	0.6
Gotas de agua	Tetraédrico libre	Normal	6	2.5	1.5	0.6	0.5
Goma de Silicona	Tetraédrico libre	Fino	500	2.5	1.4	0.4	0.7
Terminales metálicos	Tetraédrico libre	Extra Fino	15	10	1.35	0.3	0.85
Conductores	Barrido	Fino	100	15	1.45	0.5	0.6
Cable de guarda	Barrido	Fino	500	15	1.45	0.5	0.6
Yugo	Tetraédrico libre	Extra Fino	500	10	1.35	0.3	0.85
Anillos	Tetraédrico libre	Fino	100	15	1.45	0.5	0.6
Torre	Tetraédrico libre	Normal	500	15	1.5	0.6	0.5
Aire	Tetraédrico libre	Fino	5000	2.5	1.45	0.5	0.6
DEI	Barrido	Extremadamente fino	250	20	1.3	0.2	1

Número de elementos de la malla – condición seca
(Fuente: Elaboración propia)

Material	Elementos en dominios	Elementos en Fronteras	Bordes	Porcentaje del total
FRP	7 967	5 358	700	0.8%
Goma de silicona	102 986	64 826	12 999	10.0%
Terminales	5 340	1 274	180	0.5%
Conductores	7 200	10 840	3 660	0.7%
Yugo	2 082	1 086	258	0.2%
Torre	2 861	1 206	250	0.3%
Aire	885 086	1 574	103	86.3%
DEI	11 952	2 934	340	1.2%
Total	1 025 474	89 098	18 490	t = 4 min 25 s

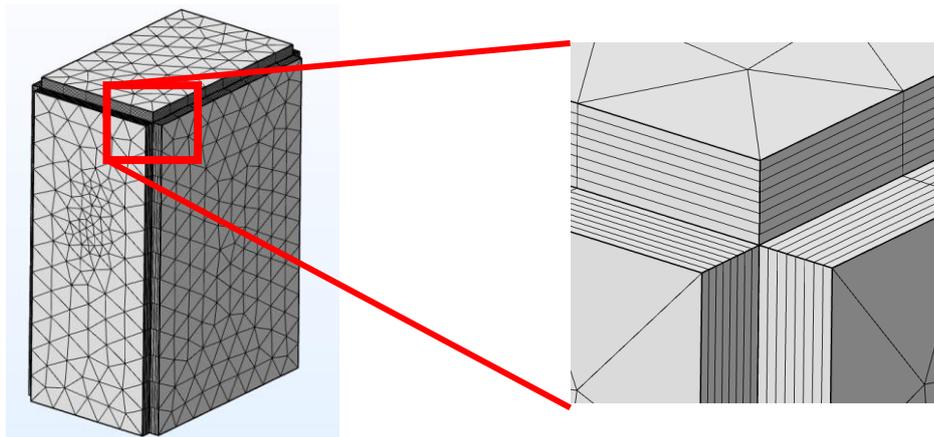
Número de elementos de la malla – Con contaminante
(Fuente: Elaboración propia)

Material	Elementos en dominios	Elementos en Fronteras	Bordes	Porcentaje del total
FRP	7 967	5 358	700	0.6%
Goma de silicona	103 178	64 994	12 999	7.3%
Contaminación	225 533	85 104	13 689	15.9%
Terminales	5 161	1 200	180	0.4%
Conductores	5 760	8 672	2 928	0.4%
Cable de guarda	360	548	192	0.0%
Yugo	2 082	1 086	258	0.1%
Anillos	17 637	6 004	534	1.2%
Torre	43 486	6 234	598	3.1%
Aire	983 720	2 466	107	69.4%
DEI	22 752	4 332	346	1.6%
TOTAL	1 417 636	185 998	32 531	t = 3 min 21 s

Número de elementos de la malla – Con gotas
(Fuente: Elaboración propia)

Material	Elementos en dominios	Elementos en Fronteras	Bordes	Porcentaje del total
FRP	7 967	5 358	700	0.3%
Gotas de agua	32 376	37 130	10 496	1.4%
Goma de silicona	394 682	168 144	19 338	17.3%
Terminales	7 052	1 284	180	0.3%
Conductores	5 760	8 672	2 928	0.3%
Cable de guarda	288	440	156	0.0%
Yugo	2 082	1 086	258	0.1%
Anillos	17 635	6 004	534	0.8%
Torre	43 476	6 234	598	1.9%
Aire	1752 223	2 474	107	76.6%
DEI	22 816	4 340	346	1.0%
TOTAL	2 286 357	241 166	35 641	t = 15 min 47 s

A fin de encapsular el modelo y que las fronteras exteriores no influyan en los resultados de la simulación, se definió un dominio artificial llamado Dominio de Elementos Infinitos (DEI) hecho de aire. Un nodo del DEI aplica una escala de coordenadas de valor real a una capa de dominios virtuales que rodean la región física de interés. Como las variables dependientes varían lentamente con la distancia radial desde el centro del modelo, los elementos finitos pueden estirarse en la dirección radial de modo que las condiciones de contorno en el exterior de la capa de elementos infinitos se apliquen efectivamente a una distancia muy grande de cualquier región de interés; es decir, representa el infinito.



Dominio de Elementos Infinitos
(Fuente: Elaboración propia)

4. Suposiciones y simplificaciones

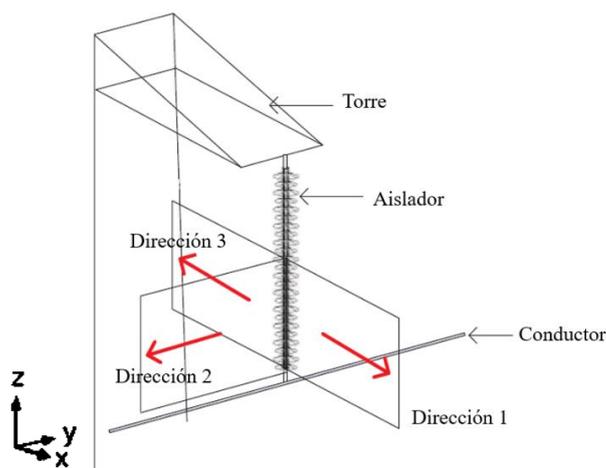
- No se considera la influencia de las otras 2 fases, tampoco se considera el efecto de la temperatura (radiación solar) en la variación de permitividad y conductividad de los materiales. Se supone que todos los materiales dieléctricos son lineales, es decir, la permitividad es constante e independiente de la intensidad del campo eléctrico.
- El modelo se considera una región libre de carga volumétrica. No se incorporan distribuciones de carga para ningún caso.
- Para fines prácticos, la tensión aplicada es constante y esta expresada en RMS, siendo $V_{\text{fase-tierra}} = V_{\text{línea-línea}}/\sqrt{3}$.
- Las aletas si se consideran, pero se puede prescindir de ellas, ya que según (T. Doshi et al., 2011) su impacto en el valor máximo del campo eléctrico es solo del 3%.
- La longitud de los conductores de fase es 7.2 veces la del aislador, ya que según (Zhao & Comber, 2000) esto influye en la distribución del campo eléctrico. En caso de no considerarse, en la región del lado 0V el campo eléctrico sería mucho más intenso que en la región del terminal AT. Bajo la misma premisa es que se incluye el suelo en el modelo.
- Por simplicidad, el cable de guarda y los conductores tienen las mismas propiedades del cobre.
- El problema del infinito en las fronteras exteriores del modelo se resuelve con la aplicación del Dominio de Elementos Infinitos (DEI).
- Se incluye parte de la torre, como un perfil extruido en el eje Y.
- No se han representado todos los detalles de la ferretería, como contrapesos, varillas de armar, grapas, conectores, rotulas, grilletes y descargadores, ya que demandaría más tiempo de dibujo y se incrementaría la probabilidad error al importar. Estos elementos cumplen una función mecánica, más no eléctrica, por ende, pueden obviarse.
- Debido a lo particular de este tipo de análisis, no se encontró el diámetro típico para la fibra de vidrio, definiéndose un diámetro de aproximadamente 25.67 mm. Igualmente para el espesor de

la goma de silicona sobre el FRP, que se asume de 2.82 mm.

- En condición de lluvia, solo se incluyen gotas de agua en las regiones cercanas al lado AT y al lado 0V, esto para limitar el número de elementos discretizados y reducir el tiempo de cálculo.

5. Extracción de información

Pueden establecerse tres direcciones representativas para la recolección de información, como se muestra a continuación, la información puede extraerse a través de líneas de extracción de información.

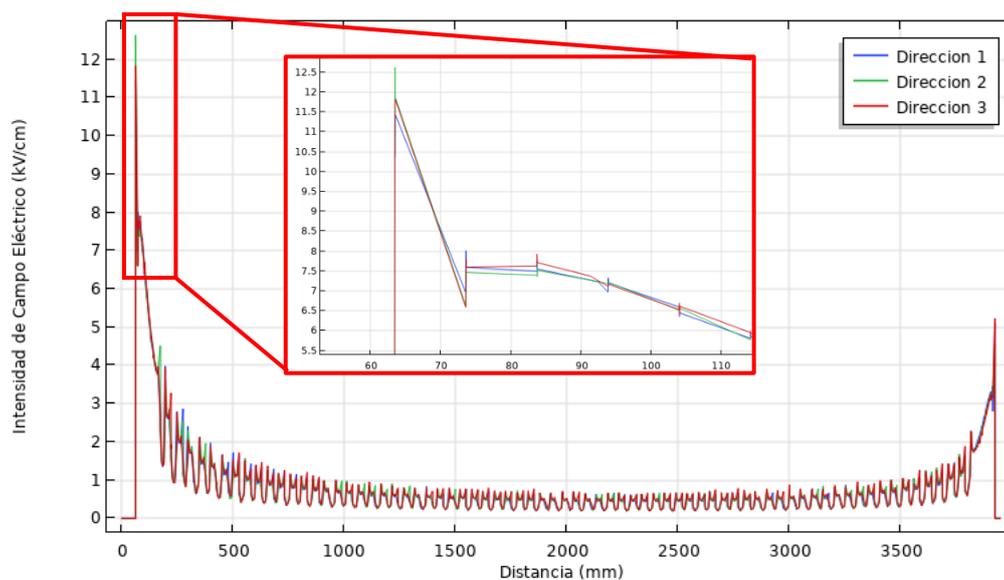


Direcciones de recolección de información
(Fuente: Elaboración propia)

Donde la dirección 1 tiene el mismo sentido que el eje X, la dirección 2 tiene sentido contrario al eje Y, y la dirección 3 tiene sentido contrario al eje X.

Líneas de extracción de datos
(Fuente: Elaboración propia)

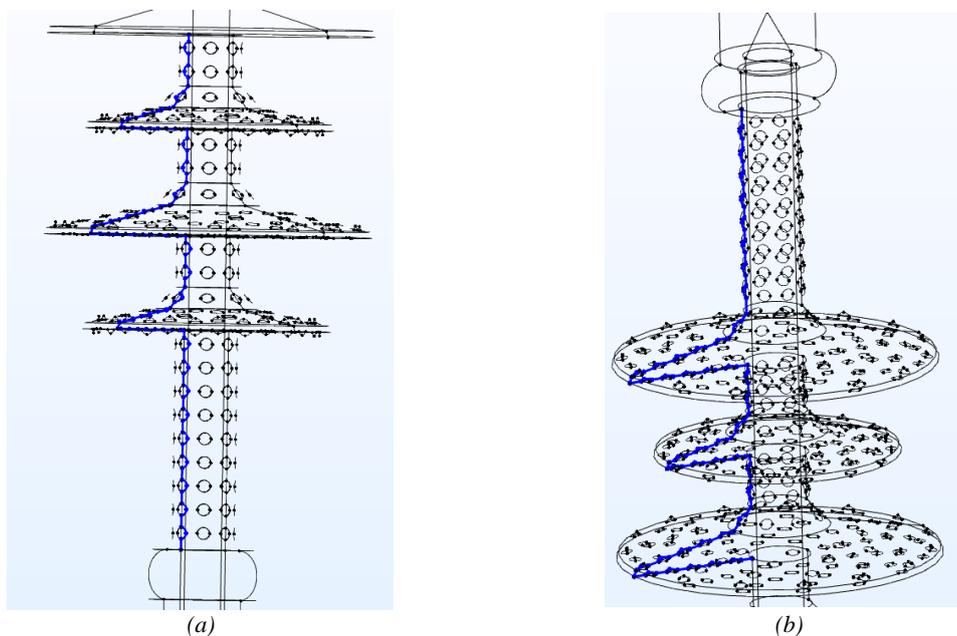
Línea		x (mm)	y (mm)	z (mm)	E máx (kV/cm)
Dirección 1	Pi	13392.706	0.000	35897.736	11.44
	Pf	13392.706	0.000	39851.745	
Dirección 2	Pi	13377.003	-15.703	35897.736	12.63
	Pf	13377.003	-15.703	39851.745	
Dirección 3	Pi	13361.300	0.000	35897.736	12.19
	Pf	13361.300	0.000	39851.745	



Comparación del campo eléctrico en cada dirección
(Fuente: Elaboración propia)

Nótese que los resultados son similares para las direcciones 2 y 3, en el presente trabajo la información se extrae sobre la superficie del aislador en la dirección 3.

Para el caso en condición de lluvia, la información se extrae por caminos que rodean a las gotas, siempre a través de la dirección 3.



Líneas de extracción de datos - Condición de lluvia - para (a) lado AT y (b) lado 0V
(Fuente: Elaboración propia)

ANEXO C.- Resultados del barrido paramétrico

Resultados del barrido paramétrico en condición seca para el anillo tipo A2

BARRIDO PARAMÉTRICO - CONDICIÓN SECA - ANILLO TIPO A2								
Ep0 :	3.418	III-CS-A2				Máx. kl :	Máx. kp :	Máx. kc :
Xp0 :	407					13.19%	42.12%	5.27%
Nº	A2dr (mm)	A2dR (mm)	A2dH (mm)	Epn (kV/cm)	Xpn (mm)	kl (Limitación)	kp (Protección)	kc (Selección)
#1	-10	-25	75	3.674	534	-7.50%	23.79%	N.A
#2	-10	-25	50	3.693	407	-8.04%	-0.12%	N.A
#3	-10	-25	25	3.598	407	-5.28%	-0.12%	N.A
#4	-10	-25	0	3.407	407	0.33%	-0.12%	N.A
#5	-10	-25	-25	3.160	213	7.53%	-91.34%	N.A
#6	-10	-25	-50	3.521	0	-3.03%		N.A
#7	-10	0	75	3.431	534	-0.40%	23.79%	N.A
#8	-10	0	50	3.376	534	1.23%	23.79%	0.29%
#9	-10	0	25	3.268	407	4.38%	-0.12%	N.A
#10	-10	0	0	3.253	407	4.83%	-0.12%	N.A
#11	-10	0	-25	3.261	0	4.60%		N.A
#12	-10	0	-50	3.807	0	-11.39%		N.A
#13	-10	25	75	3.166	534	7.36%	23.79%	1.75%
#14	-10	25	50	3.166	534	7.38%	23.79%	1.75%
#15	-10	25	25	3.026	381	11.47%	-6.84%	N.A
#16	-10	25	0	3.143	0	8.03%		N.A
#17	-10	25	-25	3.607	0	-5.52%		N.A
#18	-10	25	-50	4.084	0	-19.50%		N.A
#19	-10	50	75	2.967	678	13.19%	39.93%	5.27%
#20	-10	50	50	2.988	534	12.58%	23.79%	2.99%
#21	-10	50	25	3.032	0	11.30%		N.A
#22	-10	50	0	3.462	0	-1.29%		N.A
#23	-10	50	-25	3.932	0	-15.03%		N.A
#24	-10	50	-50	4.393	0	-28.54%		N.A
#25	0	-25	75	3.854	534	-12.76%	23.79%	N.A
#26	0	-25	50	3.794	534	-10.99%	23.79%	N.A
#27	0	-25	25	3.651	407	-6.81%	-0.12%	N.A
#28	0	-25	0	3.558	407	-4.10%	-0.12%	N.A
#29	0	-25	-25	3.337	407	2.36%	-0.12%	N.A
#30	0	-25	-50	3.139	213	8.17%	-91.34%	N.A
#31	0	0	75	3.524	534	-3.11%	23.79%	N.A
#32	0	0	50	3.415	534	0.09%	23.79%	0.02%
#33	0	0	25	3.438	407	-0.60%	-0.12%	N.A
#34	0	0	0	3.361	407	1.68%	-0.12%	N.A
#35	0	0	-25	3.222	407	5.74%	-0.12%	N.A
#36	0	0	-50	3.333	0	2.48%		N.A
#37	0	25	75	3.288	678	3.80%	39.93%	1.52%
#38	0	25	50	3.266	534	4.43%	23.79%	1.05%
#39	0	25	25	3.192	407	6.59%	-0.12%	N.A
#40	0	25	0	3.181	407	6.93%	-0.12%	N.A
#41	0	25	-25	3.106	0	9.11%		N.A
#42	0	25	-50	3.655	0	-6.95%		N.A
#43	0	50	75	3.059	678	10.50%	39.93%	4.19%
#44	0	50	50	3.044	534	10.94%	23.79%	2.60%
#45	0	50	25	3.054	534	10.66%	23.79%	2.54%
#46	0	50	0	3.024	407	11.51%	-0.12%	N.A
#47	0	50	-25	3.474	0	-1.64%		N.A
#48	0	50	-50	3.994	0	-16.87%		N.A
#49	10	-25	75	4.012	534	-17.37%	23.79%	N.A
#50	10	-25	50	3.926	534	-14.88%	23.79%	N.A
#51	10	-25	25	3.843	407	-12.44%	-0.12%	N.A
#52	10	-25	0	3.685	407	-7.80%	-0.12%	N.A
#53	10	-25	-25	3.372	407	1.34%	-0.12%	N.A
#54	10	-25	-50	3.238	407	5.25%	-0.12%	N.A
#55	10	0	75	3.578	678	-4.68%	39.93%	N.A
#56	10	0	50	3.583	534	-4.84%	23.79%	N.A
#57	10	0	25	3.402	534	0.45%	23.79%	0.11%
#58	10	0	0	3.445	407	-0.79%	-0.12%	N.A
#59	10	0	-25	3.316	407	2.99%	-0.12%	N.A
#60	10	0	-50	3.081	407	9.86%	-0.12%	N.A
#61	10	25	75	3.336	704	2.41%	42.12%	1.01%
#62	10	25	50	3.301	534	3.41%	23.79%	0.81%
#63	10	25	25	3.268	534	4.38%	23.79%	1.04%
#64	10	25	0	3.208	407	6.15%	-0.12%	N.A
#65	10	25	-25	3.172	407	7.18%	-0.12%	N.A
#66	10	25	-50	3.255	0	4.75%		N.A
#67	10	50	75	3.135	704	8.28%	42.12%	3.49%
#68	10	50	50	3.068	534	10.23%	23.79%	2.43%
#69	10	50	25	3.082	534	9.83%	23.79%	2.34%
#70	10	50	0	3.055	407	10.63%	-0.12%	N.A
#71	10	50	-25	3.043	0	10.97%		N.A
#72	10	50	-50	3.600	0	-5.33%		N.A

N.A : No aplica

Resultados del barrido paramétrico en condición secas para el anillo tipo A3

BARRIDO PARAMÉTRICO - CONDICIÓN SECA - ANILLO TIPO A3											
Ep0 :	3.418	III-CS-A3				Máx. kl :	31.63%	Máx. kp :	63.90%	Máx. kc :	20.21%
Xp0 :	407										
N°	A3dr (mm)	A3dR (mm)	A3dH (mm)	Epn (kV/cm)	Xpn (mm)	kl (Limitación)	kp (Protección)	kc (Selección)			
#1	-12	-60	-60	3.683	407	-7.75%	-0.12%	N.A			
#2	-12	-60	0	3.620	407	-5.91%	-0.12%	N.A			
#3	-12	-60	60	3.479	407	-1.78%	-0.12%	N.A			
#4	-12	-60	120	3.203	534	6.29%	23.79%	1.50%			
#5	-12	-60	180	3.032	704	11.28%	42.12%	4.75%			
#6	-12	-60	240	2.970	1001	13.09%	59.29%	7.76%			
#7	-12	0	-60	3.485	381	-1.98%	-6.84%	N.A			
#8	-12	0	0	3.443	407	-0.75%	-0.12%	N.A			
#9	-12	0	60	3.250	407	4.91%	-0.12%	N.A			
#10	-12	0	120	2.949	534	13.73%	23.79%	3.27%			
#11	-12	0	180	2.718	704	20.49%	42.12%	8.63%			
#12	-12	0	240	2.631	1001	23.03%	59.29%	13.65%			
#13	-12	60	-60	3.437	407	-0.55%	-0.12%	N.A			
#14	-12	60	0	3.291	407	3.71%	-0.12%	N.A			
#15	-12	60	60	3.081	407	9.85%	-0.12%	N.A			
#16	-12	60	120	2.752	510	19.47%	20.10%	3.91%			
#17	-12	60	180	2.515	704	26.41%	42.12%	11.12%			
#18	-12	60	240	2.382	1001	30.29%	59.29%	17.96%			
#19	0	-60	-60	3.645	407	-6.64%	-0.12%	N.A			
#20	0	-60	0	3.395	407	0.66%	-0.12%	N.A			
#21	0	-60	60	3.371	407	1.38%	-0.12%	N.A			
#22	0	-60	120	3.049	534	10.79%	23.79%	2.57%			
#23	0	-60	180	3.001	704	12.20%	42.12%	5.14%			
#24	0	-60	240	3.045	1001	10.91%	59.29%	6.47%			
#25	0	0	-60	3.503	407	-2.49%	-0.12%	N.A			
#26	0	0	0	3.279	407	4.05%	-0.12%	N.A			
#27	0	0	60	3.126	407	8.53%	-0.12%	N.A			
#28	0	0	120	2.837	534	17.00%	23.79%	4.04%			
#29	0	0	180	2.651	704	22.43%	42.12%	9.45%			
#30	0	0	240	2.582	1001	24.45%	59.29%	14.50%			
#31	0	60	-60	3.361	407	1.67%	-0.12%	N.A			
#32	0	60	0	3.189	407	6.71%	-0.12%	N.A			
#33	0	60	60	2.946	407	13.81%	-0.12%	N.A			
#34	0	60	120	2.658	534	22.22%	23.79%	5.28%			
#35	0	60	180	2.449	1001	28.35%	59.29%	16.81%			
#36	0	60	240	2.378	1001	30.43%	59.29%	18.05%			
#37	12	-60	-60	3.604	407	-5.44%	-0.12%	N.A			
#38	12	-60	0	3.491	407	-2.14%	-0.12%	N.A			
#39	12	-60	60	3.259	407	4.65%	-0.12%	N.A			
#40	12	-60	120	3.021	704	11.62%	42.12%	4.89%			
#41	12	-60	180	2.981	807	12.79%	49.51%	6.33%			
#42	12	-60	240	3.012	1001	11.88%	59.29%	7.04%			
#43	12	0	-60	3.360	407	1.70%	-0.12%	N.A			
#44	12	0	0	3.203	407	6.28%	-0.12%	N.A			
#45	12	0	60	3.005	407	12.09%	-0.12%	N.A			
#46	12	0	120	2.772	678	18.91%	39.93%	7.55%			
#47	12	0	180	2.679	1001	21.63%	59.29%	12.82%			
#48	12	0	240	2.658	1001	22.24%	59.29%	13.19%			
#49	12	60	-60	3.291	407	3.72%	-0.12%	N.A			
#50	12	60	0	3.097	407	9.40%	-0.12%	N.A			
#51	12	60	60	2.822	407	17.43%	-0.12%	N.A			
#52	12	60	120	2.549	678	25.41%	39.93%	10.15%			
#53	12	60	180	2.448	1001	28.36%	59.29%	16.82%			
#54	12	60	240	2.337	1128	31.63%	63.90%	20.21%			

N.A : No aplica

Resultados del barrido paramétrico en condición de lluvia para el anillo tipo A2

BARRIDO PARAMÉTRICO - CONDICIÓN DE LLUVIA - ANILLO TIPO A2											
Ep0 :	9.989	III-CH-A2				Máx. kl :	3.50%	Máx. kp :	65.77%	Máx. kc :	1.93%
Xp0 :	299										
Nº	A2dr (mm)	A2dR (mm)	A2dH (mm)	Epn (kV/cm)	Xpn (mm)	kl (Limitación)	kp (Protección)	kc (Selección)			
#1	-10	-25	-100	16.887	49	-69.06%	-513.86%	N.A			
#2	-10	-25	-50	12.793	96	-28.07%	-212.82%	N.A			
#3	-10	-25	0	13.255	299	-32.70%	-0.02%	N.A			
#4	-10	-25	50	13.539	488	-35.55%	38.68%	N.A			
#5	-10	0	-100	17.282	27	-73.02%	-1003.81%	N.A			
#6	-10	0	-50	11.968	33	-19.81%	-803.78%	N.A			
#7	-10	0	0	11.708	488	-17.21%	38.68%	N.A			
#8	-10	0	50	11.452	651	-14.65%	54.00%	N.A			
#9	-10	50	-100	14.700	17	-47.17%	-1612.62%	N.A			
#10	-10	50	-50	12.672	27	-26.86%	-1003.81%	N.A			
#11	-10	50	0	9.983	27	0.06%	-1003.81%	N.A			
#12	-10	50	50	9.639	666	3.50%	55.08%	1.93%			
#13	0	-25	-100	15.193	33	-52.10%	-803.78%	N.A			
#14	0	-25	-50	11.996	299	-20.09%	-0.02%	N.A			
#15	0	-25	0	11.934	299	-19.48%	-0.02%	N.A			
#16	0	-25	50	13.419	666	-34.34%	55.08%	N.A			
#17	0	0	-100	14.381	17	-43.97%	-1612.62%	N.A			
#18	0	0	-50	11.733	49	-17.46%	-513.86%	N.A			
#19	0	0	0	11.542	299	-15.55%	-0.02%	N.A			
#20	0	0	50	12.746	666	-27.60%	55.08%	N.A			
#21	0	50	-100	14.177	27	-41.93%	-1003.81%	N.A			
#22	0	50	-50	10.914	290	-9.26%	-3.35%	N.A			
#23	0	50	0	10.066	666	-0.77%	55.08%	N.A			
#24	0	50	50	10.028	666	-0.39%	55.08%	N.A			
#25	10	-25	-100	14.232	33	-42.48%	-803.78%	N.A			
#26	10	-25	-50	12.327	127	-23.40%	-135.75%	N.A			
#27	10	-25	0	12.443	666	-24.57%	55.08%	N.A			
#28	10	-25	50	13.627	488	-36.43%	38.68%	N.A			
#29	10	0	-100	13.325	17	-33.40%	-1612.62%	N.A			
#30	10	0	-50	12.816	274	-28.30%	-9.25%	N.A			
#31	10	0	0	11.790	666	-18.03%	55.08%	N.A			
#32	10	0	50	11.082	651	-10.94%	54.00%	N.A			
#33	10	50	-100	14.467	49	-44.83%	-513.86%	N.A			
#34	10	50	-50	11.060	290	-10.72%	-3.35%	N.A			
#35	10	50	0	9.820	874	1.69%	65.77%	1.11%			
#36	10	50	50	10.569	874	-5.81%	65.77%	N.A			

N.A : No aplica

Resultados del barrido paramétrico en condición de lluvia para el anillo tipo A3

BARRIDO PARAMÉTRICO - CONDICIÓN DE LLUVIA - ANILLO TIPO A3											
Ep0 :	9.989	III-CH-A3				Máx. kl :	71.571%	Máx. kp :	71.569%	Máx. kc :	47.161%
Xp0 :	299										
N°	A3dr (mm)	A3dR (mm)	A3dH (mm)	Epn (kV/cm)	Xpn (mm)	kl (Limitación)	kp (Protección)	kc (Selección)			
#1	-12	0	-60	10.430	874	-4.42%	65.77%	N.A			
#2	-12	0	0	10.296	874	-3.08%	65.77%	N.A			
#3	-12	0	60	10.163	874	-1.74%	65.77%	N.A			
#4	-12	0	120	10.024	874	-0.35%	65.77%	N.A			
#5	-12	0	240	8.495	874	14.95%	65.77%	9.83%			
#6	-12	0	480	3.650	874	63.46%	65.77%	41.74%			
#7	-12	60	-60	10.173	874	-1.84%	65.77%	N.A			
#8	-12	60	0	10.065	874	-0.76%	65.77%	N.A			
#9	-12	60	60	9.905	874	0.84%	65.77%	0.55%			
#10	-12	60	120	9.579	874	4.10%	65.77%	2.70%			
#11	-12	60	240	7.896	874	20.95%	65.77%	13.78%			
#12	-12	60	480	4.509	874	54.86%	65.77%	36.08%			
#13	-12	120	-60	9.959	874	0.30%	65.77%	0.20%			
#14	-12	120	0	9.776	874	2.13%	65.77%	1.40%			
#15	-12	120	60	9.214	874	7.76%	65.77%	5.10%			
#16	-12	120	120	8.975	874	10.15%	65.77%	6.68%			
#17	-12	120	240	7.920	874	20.71%	65.77%	13.62%			
#18	-12	120	480	5.100	865	48.94%	65.39%	32.00%			
#19	0	0	-60	10.310	874	-3.22%	65.77%	N.A			
#20	0	0	0	9.783	874	2.06%	65.77%	1.36%			
#21	0	0	60	10.283	874	-2.95%	65.77%	N.A			
#22	0	0	120	9.742	874	2.47%	65.77%	1.63%			
#23	0	0	240	7.986	874	20.05%	65.77%	13.19%			
#24	0	0	480	2.920	874	70.77%	65.77%	46.55%			
#25	0	60	-60	10.084	874	-0.96%	65.77%	N.A			
#26	0	60	0	9.714	874	2.75%	65.77%	1.81%			
#27	0	60	60	9.606	874	3.83%	65.77%	2.52%			
#28	0	60	120	9.141	874	8.48%	65.77%	5.58%			
#29	0	60	240	7.432	874	25.59%	65.77%	16.83%			
#30	0	60	480	3.407	1053	65.90%	71.57%	47.16%			
#31	0	120	-60	9.505	874	4.85%	65.77%	3.19%			
#32	0	120	0	9.726	874	2.64%	65.77%	1.73%			
#33	0	120	60	9.078	874	9.12%	65.77%	6.00%			
#34	0	120	120	8.722	874	12.68%	65.77%	8.34%			
#35	0	120	240	7.435	874	25.57%	65.77%	16.82%			
#36	0	120	480	3.834	874	61.62%	65.77%	40.53%			
#37	12	0	-60	10.224	874	-2.36%	65.77%	N.A			
#38	12	0	0	10.076	874	-0.87%	65.77%	N.A			
#39	12	0	60	9.839	874	1.50%	65.77%	0.99%			
#40	12	0	120	9.582	874	4.08%	65.77%	2.68%			
#41	12	0	240	8.050	1053	19.41%	71.57%	13.89%			
#42	12	0	480	3.249	74	67.47%	-304.26%	N.A			
#43	12	60	-60	9.932	874	0.57%	65.77%	0.37%			
#44	12	60	0	9.522	874	4.67%	65.77%	3.07%			
#45	12	60	60	9.502	874	4.87%	65.77%	3.21%			
#46	12	60	120	9.008	874	9.81%	65.77%	6.46%			
#47	12	60	240	7.138	874	28.54%	65.77%	18.77%			
#48	12	60	480	2.840	874	71.57%	65.77%	47.07%			
#49	12	120	-60	9.460	874	5.29%	65.77%	3.48%			
#50	12	120	0	9.412	874	5.77%	65.77%	3.80%			
#51	12	120	60	8.685	874	13.05%	65.77%	8.59%			
#52	12	120	120	8.134	874	18.57%	65.77%	12.22%			
#53	12	120	240	6.847	874	31.45%	65.77%	20.69%			
#54	12	120	480	5.765	609	42.29%	50.90%	21.52%			

N.A : No aplica