

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Evaluación de las Propiedades del Aceite Dieléctrico para Mejorar los
Parámetros Serie y Paralelo de las Líneas de Transmisión.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería en Electricidad

Presentado por:

Christian Andres Apolo Tinoco

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a mis padres, cuyo sacrificio y cariño incondicional me ha permitido cumplir una más de mis metas. A mi hermano que siempre ha estado a mi lado para apoyarme y cuidarme. A mis amigos que de una u otra manera me ayudaron cuando los necesitaba. Finalmente le quiero agradecer a mi compañera de vida Mariuxi S., que ha sido un gran pilar emocional demostrándome su confianza, apoyo y afecto a lo largo de todo este trayecto.

Christian Apolo Tinoco

AGRADECIMIENTO

Mis más sinceros agradecimientos a mi familia y amigos por su apoyo incondicional, y por todas las memorias y experiencias vividas que han contribuido a mi formación moral y social.

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral y a todos los docentes que he tenido a lo largo de mis años de estudio por forjarme como profesional.

Finalmente, al Ph.D. Manuel S. Alvarez-Alvarado, por su guía, apoyo y retroalimentación a lo largo de este proyecto.

Christian Apolo Tinoco

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; **Christian Andres Apolo Tinoco** doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Electronically
signed by:
Christian Andres
Apolo Tinoco
Reason: I am
signing for the
reasons as stated
in the document.
Date: Feb 16,
2022 17:44 EST

Christian Andres
Apolo Tinoco

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
**MANUEL SEBASTIAN
ALVAREZ ALVARADO**

.....
M.Sc. Fernando Vaca Urbano

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Ph.D. Manuel S. Alvarez-Alvarado

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Los sistemas de transmisión de alta tensión experimentan pérdidas de potencia significativas a lo largo de su recorrido debido a fenómenos eléctricos. Sin embargo, los métodos tradicionales involucran mejoras en las propiedades de los materiales o cambios en su disposición geométrica lo cual implica una elección entre mayor costo del proyecto o mayor costo de operación.

El desarrollo del proyecto se basó en el uso de COMSOL Multiphysics para investigar el comportamiento de los parámetros serie y paralelo de una línea de transmisión al aplicar aceite dieléctrico en los puntos calientes. Para esto se diseñó el modelo de la línea respetando las propiedades físicas de los materiales y posteriormente se calculó los parámetros eléctricos de la Línea de transmisión con el conductor desnudo y con recubrimiento dieléctrico. Luego de esto se analizó el efecto aislador, corona y piel sobre el conductor y cómo estos se ven afectados por el recubrimiento dieléctrico mediante variaciones de voltaje y barridos de frecuencia respectivamente. Esto permitió obtener los parámetros ABCD de la línea bajo condiciones normales de operación, bajo efecto corona y con efecto corona suprimido con el dieléctrico, con lo cual se realizó un análisis de la capacidad de transmisión de la línea mediante un diagrama de círculo.

Considerando un escenario donde la carga es puramente resistiva, el efecto corona redujo la capacidad de transmisión de la línea en un 11.4% en comparación a cuando opera bajo condiciones nominales. Sin embargo, al aplicar el recubrimiento con aceite dieléctrico se mitigó parcialmente los efectos de la descarga por corona logrando que la potencia máxima que la línea es capaz de transferir se reduzca a un 6.16%. Con lo cual se demuestra que a diferencia de los parámetros serie, los parámetros paralelo se ven afectados por el recubrimiento dieléctrico debido a su relación con las pérdidas ocasionadas por el efecto corona.

Palabras clave: Línea de transmisión, parámetros eléctricos, aceite dieléctrico, efecto corona, efecto aislador, efecto piel, COMSOL Multiphysics.

ABSTRACT

High voltage transmission systems experience significant power losses along their path due to electrical phenomena. However, traditional methods involve improvements in the properties of the materials or changes in their geometric arrangement, which implies a choice between higher project cost or higher operating cost.

The development of the project was based on the use of COMSOL Multiphysics to investigate the behavior of the series and parallel parameters of a transmission line when dielectric oil is applied to hot spots. The model of the line was designed respecting the physical properties of the materials and subsequently the electrical parameters of the transmission line with the bare conductor and dielectric coating were calculated. Afterwards, the insulating effect, corona and skin on the conductor were analyzed and how these are affected by the dielectric coating through voltage variations and frequency sweeps, respectively. This allowed us to obtain the ABCD parameters of the line under normal operating conditions, corona effect and with corona effect suppressed with the dielectric, with which an analysis of the transmission capacity of the line was carried out using a circle diagram.

Considering a scenario where the load is purely resistive, the corona effect reduced the transmission capacity of the line by 11.4% compared to when it operates under nominal conditions. However, by applying the coating with dielectric oil, the effects of corona discharge were partially mitigated, reducing the maximum power that the line is capable of transferring to 6.16%. With this it has been shown that unlike the series parameters, the parallel parameters are affected by the dielectric coating due to their relationship with the losses caused by the corona effect.

Keywords: *Transmission line, electrical parameters, dielectric oil, corona effect, insulating effect, skin effect, COMSOL Multiphysics.*

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1.....	11
1. Introducción	11
1.1 Descripción del problema.....	11
1.2 Justificación del problema.....	12
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo General.....	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
CAPÍTULO 2.....	14
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Líneas de Transmisión.....	14
2.1.1 Líneas de Transmisión Aéreas	14
2.1.2 Parámetros de las Líneas de Transmisión	16
2.1.3 Efectos Sobre Líneas de Transmisión Aéreas.....	22
2.1.4 Modelos de las Líneas de Transmisión	25
2.1.5 Diagrama de círculo de potencia	27
2.2 Aceite Dieléctrico	28
2.3 COMSOL Multiphysics	30
2.3.1 Método de Elementos Finitos	30
2.3.2 Librería – AC/DC Module.....	31
CAPÍTULO 3.....	32
3. Metodología	32
3.1 Definición del Sistema de Transmisión	32
3.2 Diseño de la L/T empleando COMSOL Multiphysics y AutoCAD.....	34
3.2.1 Diseño geométrico de la línea de transmisión	34
3.2.2 Propiedades Eléctricas de los Materiales	38
3.2.3 Mallado.....	39

3.2.4	Recubrimiento con Aceite dieléctrico.....	40
3.3	Cálculo de los parámetros eléctricos de la línea de transmisión.....	41
3.3.1	Cálculo de capacitancia y conductancia.....	41
3.3.2	Cálculo de Inductancia y Resistencia.....	43
3.4	Pérdidas de Potencia usando COMSOL Multiphysics.....	45
3.5	Efectos sobre Líneas de Transmisión.....	46
3.5.1	Efecto Aislador.....	46
3.5.2	Efecto Corona usando COMSOL Multiphysics.....	46
3.5.3	Efecto Piel usando COMSOL Multiphysics.....	48
3.6	Modelamiento de la Línea de Transmisión como red de dos puertos.....	49
CAPÍTULO 4.....		50
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	50
4.1	Análisis de los parámetros eléctricos del conductor.....	50
4.1.1	Escenario de control.....	50
4.1.2	Escenario con recubrimiento dieléctrico.....	52
4.2	Análisis de las pérdidas de potencia en el conductor y neutro.....	53
4.3	Análisis del efecto aislador.....	54
4.4	Análisis del efecto corona.....	54
4.4.1	Escenario de control.....	55
4.4.2	Escenario considerando efecto corona.....	55
4.4.3	Escenario considerando efecto corona y recubrimiento dieléctrico.....	57
4.5	Análisis del efecto piel.....	59
4.6	Análisis de flujo de potencia de los modelos obtenidos.....	60
4.7	Aplicación práctica en el ambiente laboral.....	62
CAPÍTULO 5.....		66
5.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	66
5.1	Conclusiones.....	66

5.2	Recomendaciones	67
	BIBLIOGRAFÍA.....	69

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
HVDC	High Voltage Direct Current
HVAC	High Voltage Altern Current
MV	Medio Voltaje
HV	Alto Volaje
EHV	Extra Alto Voltaje
UHV	Ultra Alto Voltaje
AAC	Conductor de Aluminio
ACSR	Conductor de Aluminio con Acero Reforzado
AAAC	Conductor de Aleación de Aluminio
ACAR	Conductor de Aluminio Reforzado con Aleación de Aluminio
GMR	Radio Medio Geométrico
GMD	Distancia Media Geométrica
L/T	Línea de Transmisión
AC	Corriente Alterna
DC	Corriente Directa
FEM	Método de Elementos Finitos

SIMBOLOGÍA

V	Voltio
kV	Kilovoltio
A	Amperio
kA	Kiloamperio
W	Watt
MW	MegaWatt
Ω	Ohmio
m Ω	Miliohmio
S	Siemens
F	Faradio
μ F	Microfaradio
H	Henrio
mH	Milihenrio
Hz	Hertz
R	Resistencia
L	Inductancia
C	Capacitancia
G	Conductancia
m	Metro
km	Kilometro
mm	Milímetro
mm ²	Milímetro cuadrado
g	Gramo
kg	Kilogramo
Cu	Cobre
St	Acero

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Método de imágenes de Kelvin para el cálculo de capacitancia de una LT	.21
Figura 2.2 Red de dos puertos	26
Figura 2.3 Representación gráfica del flujo de potencia	28
Figura 3.1 Alma de acero modelada en AutoCAD	34
Figura 3.2 Conductor Bluejay modelado en AutoCAD	35
Figura 3.3 Cable de guarda de Acero Galvanizado H.S. 3/8" modelado en AutoCAD	35
Figura 3.4 Línea de transmisión trifásica de un solo circuito modelada en AutoCAD	36
Figura 3.5 Dominio Electromagnético	36
Figura 3.6 Importación del modelo en COMSOL Multiphysics	37
Figura 3.7 Modelo de L/T en COMSOL Multiphysics	37
Figura 3.8 Materiales utilizados para la simulación de la línea de transmisión	39
Figura 3.9 Mallado utilizado para la simulación	39
Figura 3.10 Conductor Bluejay con aceite dieléctrico modelado en AutoCAD	40
Figura 3.11 Material con las propiedades del Aceite vegetal Bio Electra	40
Figura 3.12 Física utilizada para el estudio de capacitancia y conductancia	41
Figura 3.13: Asignación de componentes de la física "Electric Currents (ec)"	42
Figura 3.14 Estudio en el dominio de la frecuencia	42
Figura 3.15 Error mostrado por COMSOL Multiphysics	43
Figura 3.16 Física utilizada para el estudio de inductancia y resistencia	44
Figura 3.17 Asignación de componentes de la física "Magnetic Fields (mf)"	44
Figura 3.18 Herramientas utilizadas para el cálculo de inductancia y resistencia	44
Figura 3.19 Integración superficial para el cálculo de pérdidas	45
Figura 3.20 Asignación de variaciones de voltaje a las capas del conductor	47
Figura 3.21 Dominio térmico y física "Heat Transfer in Solids (ht)"	47
Figura 3.22 Configuración de la temperatura ambiente circundante	48
Figura 3.23 Expresión para la representación gráfica de la densidad de corriente	48
Figura 3.24 Modelo de línea larga sin pérdidas	49
Figura 4.1 Campo eléctrico que experimentan los conductores de la L/T	51
Figura 4.2 Capacitancia vs grosor del recubrimiento dieléctrico	53
Figura 4.3 Potencia eléctrica de la fase A en el escenario de control	55
Figura 4.4 Potencia eléctrica de la fase A considerando efecto corona	56
Figura 4.5 Temperatura del conductor a) control b) con aceite dieléctrico	58

Figura 4.6 Densidad de corriente eléctrica para el escenario de control a una frecuencia de a) 60 Hz b) 240 Hz c) 500 Hz y el escenario con recubrimiento dieléctrico a una frecuencia de d) 60 Hz e) 240 Hz f) 500 Hz.....	59
Figura 4.7 Capacidad de transferencia de la línea de transmisión	61
Figura 4.8 Punto de operación de la L/T ante una carga resistiva pura.....	62
Figura 4.9 Mecanismo novedoso para almacenar y liberar el aceite dieléctrico	63
Figura 4.10 Mecanismo utilizado en una línea de transmisión de 230 kV	64
Figura 4.11 Vista frontal del mecanismo conectado a una L/T de 230 kV	65
Figura 4.12 Vista lateral del mecanismo conectado a una L/T de 230 kV	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Voltajes Nominales Estándar para Sistemas de Potencia [18]	15
Tabla 2.2 Características de los Tipos de Conductores de Aluminio [22].....	16
Tabla 2.3 Parámetros y Representación Gráfica de los Modelos de L/T [14], [23].....	27
Tabla 2.4: Propiedades de Fluidos Aislantes [31].....	29
Tabla 2.5 Propiedades del Aceite Vegetal "Bio Electra" [35]	30
Tabla 3.1 Características Técnicas Principales de la L/T Paute-Guayaquil [39].....	33
Tabla 3.2 Especificaciones Técnicas del Conductor Bluejay 1113 kcmil [40].....	33
Tabla 3.3 Especificaciones Técnicas del Cable de Guarda [41].....	33
Tabla 3.4 Propiedades Físicas de los Materiales	38
Tabla 3.5 Parámetro Paralelo por Fase a una Frecuencia de 60 Hz.....	43
Tabla 3.6 Parámetro Paralelo por Fase Considerando 5mm de Aceite Dieléctrico	43
Tabla 3.7 Inductancia y Resistencia de Cada Fase a una Frecuencia de 60 Hz.....	45
Tabla 3.8 Parámetros Serie por Fase Considerando 5 mm de Aceite Dieléctrico	45
Tabla 3.9 Pérdidas de Potencia en Fases y Neutro.....	46
Tabla 3.10 Pérdidas de Potencia de la L/T Considerando Recubrimiento Dieléctrico ...	46
Tabla 4.1: Parámetros Eléctricos Experimentales y Teóricos del Caso de Control	50
Tabla 4.2 Efecto del Recubrimiento Dieléctrico en los Parámetros Serie y Paralelo	52
Tabla 4.3 Pérdidas por Fase y en Neutro de la Línea de Transmisión	54
Tabla 4.4: Comparativa Entre los Parámetros Eléctricos al Considerar Efecto Corona	56
Tabla 4.5 Parámetro Paralelo Considerando Efecto Corona y Aceite Dieléctrico	57
Tabla 4.6 Parámetros ABCD de Línea Larga con Datos de COMSOL Multiphysics para el Escenario de Control, Considerando Efecto Corona y Efecto Corona Suprimido.....	60
Tabla 4.7 Parámetros de Potencia Usados para Graficar el Diagrama de Círculo	61

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

Desde inicios del siglo 21 Ecuador ha experimentado un continuo crecimiento en el consumo de energía eléctrica (kWh per cápita) [1], un claro ejemplo de esto se observa en el año 2015 donde el consumo incrementó un 11% respecto al año anterior [2], de igual manera, al analizar el consumo de energía eléctrica per cápita entre los años 2009 y 2019 se evidencia un aumento de 39.4% equivalente a un aproximado de 1.52 kWh por habitante [3]. Esto ha obligado al país a mejorar su matriz energética mediante la implementación del Plan Nacional de Eficiencia Energética y el Plan Maestro de Electricidad 2018-2027. En estos documentos se mencionan proyectos de transmisión donde las empresas encargadas deberán diseñar Líneas a niveles de tensión de 138 kV, 230 kV y 500 kV para así, reducir las pérdidas eléctricas que se originan a lo largo de la línea y mejorar la calidad de energía [4].

El incremento del nivel de tensión en líneas de transmisión ayuda a disminuir las pérdidas por efecto Joule [5], sin embargo, esto resulta en una gran deficiencia desde el punto de vista teórico, ya que da lugar a un aumento de las pérdidas debido al desplazamiento de electrones por la superficie aislante hasta la estructura metálica y posteriormente a tierra, y al paso de la corriente al ambiente a través del aire debido a la ionización de este [6], conocidos como Efecto Aislador y Efecto Corona respectivamente.

En la actualidad existen diversos métodos para disminuir y prevenir la manifestación de los Efectos Aislador y Corona, entre ellos los más utilizados implican mejoras en las propiedades del conductor o cambios en su disposición [7], Sin embargo, el inconveniente con este tipo de soluciones radica en que se ven limitadas por el ámbito económico, razón por la cual se realizan estudios que determinen el punto óptimo entre costo de diseño y pérdidas en las líneas. Debido a que estos efectos dependen tanto de propiedades de la línea de transmisión como de factores ambientales [7], toda línea de transmisión del sector Eléctrico

Ecuatoriano los experimenta en alguna parte de su recorrido, y las líneas propuestas en el Plan Maestro de Electricidad 2018-2027 no serán la excepción. Razón por lo cual es necesario evaluar la aplicación de un material dieléctrico en los cables al determinar y simular de forma precisa sus parámetros en serie y paralelo [8], de modo que se reduzca las pérdidas por estos efectos.

1.2 Justificación del problema

Hasta que se logre desarrollar un medio de transporte de energía eléctrica de forma inalámbrica es necesario seguir buscando métodos para optimizar las líneas de transmisión utilizadas en la actualidad. El uso de corriente continua de alta tensión (High Voltage Direct Current - HVDC) es uno de los métodos usados por países europeos para mejorar la calidad y estabilidad de las líneas [9]. Esto se debe que al permitir conexiones entre sistemas que operan a diferentes frecuencias es ideal para interconexiones entre países. Además, permite reducir los costos en la comercialización de energía eléctrica ya que tanto el costo de instalación como de mantenimiento es menor para sistemas HVDC en comparación a los sistemas de corriente alterna de alta tensión (High Voltage Altern Current - HVAC) [10] y presenta menos pérdidas por efecto corona [11]. Sin embargo, para líneas aéreas la longitud crítica ronda los 600 km de distancia [6], razón por lo cual no es tan recomendable aplicarlo en el país debido a la limitada extensión del territorio ecuatoriano en comparación a otros países.

La propuesta de evaluar las propiedades del aceite dieléctrico con el fin de mejorar los parámetros serie y paralelo de las líneas de transmisión considerando el efecto aislador, corona y piel, es pertinente ya que El Plan Maestro de Electricidad 2018 – 2027 del Ecuador propone la construcción de diferentes líneas de transmisión como el Sistema de Transmisión Sopladora – Cardenillo – Taday 230 kV y el Sistema de Transmisión Ecuador – Perú 500 kV con una fecha prevista de entrada en operación para el segundo semestre 2023 y el primer semestre 2025 respectivamente [4].

Se espera que, al aplicar el aceite dieléctrico en puntos críticos del conductor este se distribuya uniformemente debido a las fuerzas electroestáticas presentes [12], de tal forma que su propiedad aislante y capacidad de transferencia de calor ayude a mitigar las pérdidas producidas por el Efecto Aislador y Corona en la línea, dando

como resultado una disminución en el valor de resistencia y un aumento en el de inductancia de la línea [8].

Resultados favorables en las simulaciones de este proyecto implicarían la posibilidad de diseñar sistemas HVAC menos costosos dado que no será necesario aumentar un 150% el diámetro del conductor o el espacio entre ellos para disminuir pérdidas en las líneas [6]. Con una representación cercana a la realidad de la línea de transmisión y las condiciones climáticas, será posible que mediante un recubrimiento polimérico se aplique el aceite dieléctrico en los puntos críticos donde la temperatura sea más elevada debido a la presencia de Efecto Aislador y Corona. Además, ayudará a mejorar la calidad y servicio de energía eléctrica en el país, así como también creará oportunidades laborales para aquellos encargados de producir y reemplazar dicho recubrimiento una vez el aceite sea aplicado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Investigar los efectos del aceite dieléctrico aplicado a puntos críticos del conductor sobre el modelo de líneas de transmisión para el análisis de sus parámetros resistivo, capacitivo, inductivo y conductivo, mediante el uso de COMSOL Multiphysics.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Simular el efecto corona, aislador y piel usando COMSOL Multiphysics.
2. Estudiar el impacto del efecto aislador, corona y piel sobre el flujo de potencia en líneas de transmisión mediante el diagrama de círculo.
3. Evaluar la eficacia de la aplicación de aceite dieléctrico en puntos críticos de la línea de transmisión por medio del análisis de los parámetros serie y paralelo del conductor.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Líneas de Transmisión

Un Sistema de potencia se puede dividir en tres etapas principales: generación, transmisión y distribución [13], cada etapa cumple una función en específico, pero comparten un mismo objetivo que es abastecer la demanda eléctrica de los usuarios manteniendo una alta tasa de confiabilidad.

La función general de la red de transmisión es enlazar varias unidades de generación y transferir su energía a la red de distribución, sin embargo, también permiten la interconexión entre redes de diferentes países ya sea para la operación normal o de contingencia del sistema [14]. Por consiguiente, la planificación de una línea de transmisión (L/T) es un problema de optimización que busca nuevos componentes y estrategias para poder cubrir la demanda presente y futura de la red [15].

2.1.1 Líneas de Transmisión Aéreas

Estas líneas se encuentran suspendidas en estructuras hechas de acero, madera o concreto reforzado, el material a usar depende tanto del terreno como de las condiciones ambientales en las que se encuentren [13]. Por otra parte, para elegir el tipo de estructura a utilizar se debe de tener en cuenta el nivel de tensión, cantidad de circuito y la ruta establecida, analizando sus respectivos criterios económicos, ambientales, técnicos y sociales [16].

El nivel de tensión de una línea de transmisión debe de ser escogido tomando en consideración factores como la distancia de transmisión y la potencia requerida estimada, tratando de tener un balance con las pérdidas en el cobre, ruido audible y nivel de radio interferencia [17]. La norma Americana ANSI C84.1-2011 se ha encargado de estandarizar y dividir en grupos los niveles de tensión por encima de 60 kV para líneas de transmisión, lo cual se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Voltajes Nominales Estándar para Sistemas de Potencia [18]

Clase de Voltaje	Tensión Nominal del Sistema [kV]
Medio Voltaje (MV)	69
Alto Voltaje (HV)	115
	138
	161
	230
	345
Extra Alto Voltaje (EHV)	400
	500
	765
	1100
Ultra-Alto Voltaje (UHV)	1100

El conductor para utilizar es otro de los factores a considerar al momento de diseñar una línea de transmisión, puesto que debe de ser capaz de soportar no solo las corrientes estimadas, sino que también los esfuerzos mecánicos debido a condiciones ambientales como sobrecarga por viento y manguito de hielo [19].

Es importante tener claro que para determinar la capacidad máxima de la línea no solo se tiene que analizar el sistema bajo condiciones de carga máxima. Gracias a la variabilidad de la carga, el despacho económico también cambia constantemente, de tal forma que se tenga un costo de energía óptimo en todo momento. El ingreso y salida de generadores debido a cambios en el despacho económico puede ocasionar que las líneas experimenten un flujo de potencia mayor que bajo condiciones de carga máxima [20].

De manera general los conductores para líneas aéreas pueden ser hechos de cobre o aluminio, sin embargo, en la actualidad se utiliza el aluminio debido a que tiene una menor densidad y es más económico que el cobre en relación con su capacidad [21]. Existen diferentes tipos de conductores hechos de aluminio, la Tabla 2.2 recopila las propiedades más importantes de cada tipo, basándose en “Aluminum Electrical Conductor Handbook”.

Tabla 2.2 Características de los Tipos de Conductores de Aluminio [22]

Tipo de Conductor	Características
Conductor de Aluminio (AAC)	<ul style="list-style-type: none"> • Grado de Aluminio 1350-H19 • Posee la mejor relación conductividad – peso entre los conductores
Conductor de Aluminio con Acero Reforzado (ACSR)	<ul style="list-style-type: none"> • Capaz de soportar grandes tensiones mecánicas gracias al alma de acero • El acero representa entre un 11% y 18% del peso del conductor
Conductor de Aleación de Aluminio (AAAC)	<ul style="list-style-type: none"> • Aleación de aluminio 6201-T81 • Alta resistencia mecánica y ampacidad, similar al AAC y ACSR • Usado en áreas costeras donde el ACSR no puede usarse debido a la corrosión
Conductor de Aluminio Reforzado con Aleación de Aluminio (ACAR)	<ul style="list-style-type: none"> • Hebras de aleación de aluminio 6201-T81 en conjunto con aluminio 1350 • Presenta mejoras en su resistencia mecánica

2.1.2 Parámetros de las Líneas de Transmisión

En los sistemas de potencia todas las líneas de transmisión presentan propiedades eléctricas, debido a su ubicación al momento de modelar las líneas se conoce como parámetros serie a la resistencia e inductancia, mientras que la capacitancia y conductancia como parámetros en paralelo [14]. En este apartado se presentarán ecuaciones ya trabajadas, que se usan para obtener los diferentes parámetros de una línea de transmisión, el proceso matemático se ha omitido por fines didácticos, sin embargo, lo puede encontrar en el capítulo 4 del libro “Power System Analysis and Design”[23].

2.1.2.1 Resistencia de la Línea

La resistencia de un conductor es de suma importancia para realizar un estudio técnico donde se evalúe la eficiencia de la transmisión de energía, así como para el estudio económico de un proyecto. Este parámetro depende del trenzado, la resistividad del conductor a una temperatura dada, así como de la frecuencia del sistema [24].

Cuando corriente directa fluye a través de un conductor esta se distribuye uniformemente a lo largo de su sección transversal, la resistencia expresada en ohmios ante este tipo de corrientes se lo calcula con la expresión (2.1).

$$R_{dc,T} = \frac{\rho_T l}{A} \quad (2.1)$$

Trenzar alternadamente los hilos del conductor ayuda a mantenerlos en su lugar, y a su vez incrementa la resistencia del conductor un 1 o 2% con respecto a lo calculado con (2.1) [23].

La resistividad del conductor varía dependiendo de la temperatura, si esta se mantiene dentro del rango de operación normal entonces la variación es lineal y se calcula mediante la ecuación (2.2) [23].

$$\rho_{T2} = \rho_{T1} \left(\frac{T_2 + T}{T_1 + T} \right) \quad (2.2)$$

Donde ρ_{T1} y ρ_{T2} son las resistividades del conductor a temperaturas T_1 y T_2 en grados centígrados, respectivamente.

La resistencia AC de un conductor también conocida como resistencia efectiva, considera el efecto piel, del cual se hablará más adelante en este capítulo, y se la calcula con la ecuación (2.3) [23] en base a las pérdidas de potencia real P_{loss} , dada en watts [W], así como la corriente rms que circula por el conductor.

$$R_{ac} = \frac{P_{loss}}{|I_{rms}|^2} \quad (2.3)$$

2.1.2.2 Inductancia de un Línea de Transmisión Trifásica

La inductancia de un conductor es un parámetro serie que se obtiene a partir de los enlaces de flujos magnéticos internos y externos, los cuales se generan por la circulación de corriente alterna a través del mismo conductor y conductores adyacentes [25].

Para obtener la inductancia de una de las fases de una línea de transmisión, ya sea con un espaciado simétrico o asimétrico, es necesario saber calcular el Radio Medio Geométrico (GMR), y la Distancia Media Geométrica (GMD). El GMR depende de la cantidad de hilos que formen el conductor y de su disposición geométrica dentro de este, se lo puede calcular mediante la expresión (2.4) [23].

$$GMR_{xx} = \sqrt[N^2]{\prod_{k=1}^N \prod_{m=1}^N D_{km}} \quad (2.4)$$

Por consiguiente, el GRM del conductor “x” de “N” hilos, se calcula a partir de la N^2 raíz de la multiplicación de las distancias entre cada par de subconductores “k” y “m”.

El GMD depende de la cantidad de conductores que formen la línea y de su disposición geométrica en la estructura, se lo puede calcular mediante la expresión (2.5) [23].

$$GMD_{xy} = \sqrt[NM]{\prod_{k=1}^N \prod_{m=1'}^M D_{km}} \quad (2.5)$$

Por consiguiente, el GMD del conductor “x” de “N” hilos y el conductor “y” de “M” hilos, se calcula a partir de la NM raíz de la multiplicación de las distancias MN de los subconductores del conductor “x” y los subconductores del conductor “y” [23].

2.1.2.2.1 Espaciado Simétrico

En una línea trifásica cuando el espaciado entre conductores es simétrico, se dice que se forma un espaciado equilátero, donde se considera que su GMR, longitud “l” y espaciado entre conductores son el mismo para cada fase. Bajo estas condiciones la inductancia de cada fase dada en Henrios [H] se puede calcular con la expresión (2.6) [23].

$$L_f = 2\ell \times 10^{-7} \ln\left(\frac{D}{r'}\right) \quad (2.6)$$

Donde:

L_f es la inductancia de la fase (f=a, b, c) expresada en faradios

D es la distancia que existe entre los conductores dada en metros

r' es el GMR de los conductores expresado en metros

ℓ es la longitud del conductor dado en metros

Es importante destacar que r' equivale al radio del conductor multiplicado por el factor $e^{-1/4}$, este es el GMR de conductores formados por un solo hilo.

2.1.2.2.2 Espaciado Asimétrico

Las fases de una misma línea de transmisión idealmente deberían tener los mismos valores para los parámetros serie y paralelo, de tal manera que el desbalance únicamente dependa de la carga que alimenta. A pesar de esto, al transportar energía eléctrica por largas distancias se tiene que considerar el efecto de la inductancia y capacitancia, los cuales varían para cada una de las fases y por consiguiente ejerce un desbalance en las líneas [26].

Desplazar los conductores para ocupar el espacio físico de la siguiente fase de manera secuencial se conoce como transposición de líneas trifásicas, y es una solución para el problema anteriormente planteado.

Considerando una línea de trifásica con tres conductores idénticos transpuestos de forma regular, se puede calcular la inductancia de cada fase con ayuda de la ecuación (2.7) [23].

$$L_f = 2\ell \times 10^{-7} \ln \left(\frac{\sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ca}}}{r'} \right) \quad (2.7)$$

Donde:

L_f es la inductancia de la fase (f=a, b, c) expresada en faradios

D es la distancia entre cada fase respecto a la otra dada en metros

2.1.2.3 Capacitancia de un Línea de Transmisión Trifásica

La capacitancia de un conductor es un parámetro paralelo que se obtiene debido al campo eléctrico externo al conductor, los cuales se generan por la diferencia de potencia al que está sometido el conductor y conductores adyacentes [14].

Hay que tener presente que para el cálculo de la capacitancia de cada fase es conveniente hacerlo con respecto a un neutro.

2.1.2.3.1 Espaciado Simétrico

En este apartado se considera una línea de transmisión trifásica con tres conductores idénticos, y espaciados con una configuración equilátera triangular, la capacitancia de cada fase dada en Faradios [F], con respecto al neutro del sistema viene dado por la ecuación (2.8) [23].

$$C_f = \frac{5.56\ell \times 10^{-11}}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (2.8)$$

Donde

C_f es la capacitancia de la fase (f=a, b, c) expresada en henrios

ℓ es la longitud del conductor dada en metros

r es el radio del conductor expresado en metros

D es la distancia entre cada fase dado en metros

2.1.2.3.2 Espaciado Asimétrico

Considerando una línea de trifásica con tres conductores idénticos transpuestos de forma regular, se puede calcular la capacitancia de cada fase con ayuda de la ecuación (2.9) [23].

$$C_f = \frac{5.56\ell \times 10^{-11}}{\ln\left(\frac{\sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ca}}}{r}\right)} \quad (2.9)$$

Donde

C_f es la capacitancia de la fase (f=a, b, c) expresada en faradios

r es el radio del conductor dada en metros

D es la distancia entre cada fase respecto a la otra expresada en metros

2.1.2.3.3 Efecto de la Tierra en la Capacitancia

Debido a que la tierra es una superficie equipotencial, las líneas de flujo son forzadas a incidir en ella con un ángulo de 90° lo cual altera la capacitancia efectiva de la línea. Para calcular este efecto se usa el método de las imágenes de kelvin el cual consiste en considerar un conductor con una carga de igual magnitud, pero opuesta a la carga del conductor original [14], ubicada de forma simétrica con respecto a la tierra como se muestra Figura 2.1. La ecuación (2.10) [23] nos ayuda a calcular la capacitancia considerando el efecto de la tierra, sin embargo, suele ser despreciado ya que por lo general la altura de la línea de transmisión es mucho mayor a la distancia entre conductores.

$$C_f = \frac{5.56\ell \times 10^{-11}}{\ln\left(\frac{\sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ca}}}{r}\right) - \ln\left(\frac{\sqrt[3]{H_{ab}H_{bc}H_{ca}}}{\sqrt[3]{H_aH_bH_c}}\right)} \quad (2.10)$$

2.1.2.4 Conductancia de un Línea de Transmisión Trifásica

La conductancia, al igual que la capacitancia, es un parámetro paralelo de las líneas de transmisión el cual indica la facilidad de un material al paso de electrones.

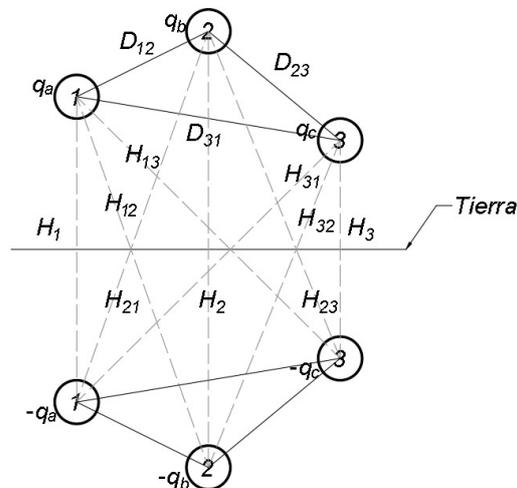


Figura 2.1 Método de imágenes de Kelvin para el cálculo de capacitancia de una LT

En modelos de L/T ayuda a representar las pérdidas de potencia real ocasionadas por los efectos Aislador y Corona [27]. La expresión (2.11) [27] permite calcular el valor de conductancia expresada en Siemens a partir de las ecuaciones (2.12) y (2.15), las cuales serán introducidas en la siguiente sección.

$$G = \frac{P_{TAislador} + P_{Corona}}{V_{1\phi}^2} \quad (2.11)$$

2.1.3 Efectos Sobre Líneas de Transmisión Aéreas

Las líneas de transmisión operan a altas, extra altas y ultra altas tensiones con el fin de minimizar las pérdidas por efecto Joule que hay en las mismas [5]. Esto las hace propensas a experimentar los efectos Aislador y Corona, los cuales en conjunto con el efecto piel que está presente para toda HVAC, también producen pérdidas de energía en la línea, pero en menor medida que el efecto Joule.

2.1.3.1 Efecto Aislador

Debido a que por lo general las plantas generadoras se encuentran alejadas de los centros de consumo, la energía eléctrica tiene que ser transportada a través de grandes distancias, donde es necesario evitar que a lo largo del recorrido las líneas vivas hagan contacto con estructuras propias o externas a la línea de transmisión. Como se vio en el subcapítulo anterior, las estructuras mayormente usadas en los sistemas de transmisión eléctrica son metálicas, por lo que es necesario el uso de aisladores para impedir el contacto directo entre los conductores y las estructuras.

Las dimensiones del aislador a utilizar están directamente relacionadas con el nivel de tensión de la línea, considerando que por cada 10 kV los electrones pueden llegar a desplazarse hasta 1cm en el a través del aire [27]. A pesar de que los aisladores son elaborados a partir de materiales con altos coeficientes dieléctricos, algunos electrones son capaces de pasar a través de él y llegar a tierra mediante las torres metálicas, este efecto incremento dependiendo de las condiciones atmosféricas y ambientales que se presenten en la línea de transmisión. Por esta razón, sin importar el material a usar o la humedad del

ambiente, siempre existirán pérdidas ocasionadas por este efecto, las cuales pueden ser calculadas con la ecuación (2.12) [27].

$$P_{TAislador} = P_{Aislador} N_{Aisladores} \quad (2.12)$$

Donde:

$P_{TAislador}$ es la pérdida de potencia total expresada en Watts

$P_{Aislador}$ es la pérdida de potencia por un aislador dada en Watts

$N_{Aisladores}$ es la cantidad de discos aisladores utilizados

2.1.3.2 Efecto Corona

Se le conoce como Efecto corona al fenómeno de descarga electrostática que ocurre cuando debido a altas intensidades de campo eléctrico el aire alrededor del aire se ioniza, de tal forma que permite el flujo de electrones a través de este como si de un conductor se tratase [7]. Este fenómeno puede verse favorecido por incrementos en los niveles de tensión de la línea, así como factores atmosféricos adversos. Hay que recordar que el aire no es un conductor, por lo que a pesar de que se ionice y permita el flujo de electrones, estos se verán frenados rápidamente hasta que su velocidad sea 0 a unos pocos centímetros de su punto de escape [27].

Dependiendo de la intensidad y condiciones lumínicas del medio, este efecto puede ser visible desde grandes distancias, cuando el halo tiene coloración rojiza significa que tiene una menor temperatura, por otra parte, cuando el haz tiene una coloración blanca o azulada significa que tiene mayor temperatura.

Para poder estudiar este efecto se definió al nivel de voltaje necesario para ionizar el aire circundante y que permita el paso de electrones como la tensión crítica disruptiva (U_c). Esta tensión es la calcula mediante la fórmula (2.13) [27].

$$U_c = 84 m_c m_t r \delta \log \left(\frac{GMD}{r} \right) \quad (2.13)$$

Donde

m_c es el coeficiente de rugosidad

m_t es el coeficiente meteorológico

r es el radio del conductor en cm

δ es la densidad relativa del aire

El coeficiente de rugosidad (m_c) toma diferentes valores dependiendo de la condición del conductor. Para conductores lisos (ideales) el valor de 1, para conductores nuevos y limpios valores en el rango de 0.96-0.88, y para cables ásperos valores en el rango de 0.8-0.87.

El coeficiente meteorológico (m_t) también varía, toma el valor de la unidad cuando se considera el aire seco, 0.8 para aire contaminado o húmedo y toma valores dentro del rango de 0.16-0.25 para ambientes lluviosos.

La densidad relativa del aire se la calcula como indica la ecuación (2.14) [27] a partir de la temperatura del medio en grados centígrados (θ) y la altura topográfica en metros (y).

$$\delta = \frac{3.921 \times 10^{1.8808 - \frac{y}{18336}}}{273 + \theta} \quad (2.14)$$

De igual manera, es necesario tener presente el nivel de tensión máximo que la línea puede alcanzar bajo condiciones de operación normales, esto se conoce como tensión más elevada (U_{me}) y se considera que es 1.15 veces el voltaje nominal de la línea.

Para determinar si existe o no efecto corona es necesario comparar ambos voltajes, si U_{me} es mayor a U_c entonces los electrones no tienen suficiente energía para ionizar el aire. Por otra parte, si esto no se cumple entonces el efecto corona está presente en la línea de transmisión y sus pérdidas se calculan con la ecuación (2.15) [27].

$$P_{corona} = \frac{241}{\delta} \ell; (f + 25) \sqrt{\frac{r}{GMD}} \left(\frac{1.15U_{LL}}{\sqrt{3}} - \frac{U_c}{\sqrt{3}} \right)^2 \times 10^{-8} \quad (2.15)$$

Donde todos los términos exceptuando la frecuencia (f) y la distancia media geométrica (GMD) ya fueron detallados anteriormente.

2.1.3.3 Efecto Piel

Cuando corriente Alterna (AC) fluye por un conductor cilíndrico la densidad de corriente es mayor cerca de la superficie y menor en el centro, este comportamiento incrementa a medida que la corriente también lo hace [14]. Este fenómeno se lo conoce como efecto Piel y causa un incremento del 2% en la resistencia del conductor con respecto a la resistencia a la corriente directa (DC) para una frecuencia de 60 Hz [23].

Este efecto sobre la resistencia del conductor se debe a que los enlaces de flujo son más intensos en el centro del conductor que a sus extremos. Por ende, la reactancia central en el conductor es mayor a la cercana a la superficie, haciendo que la mayoría de la corriente circule por la periferia del conductor. Esto produce un aumento en la resistencia efectiva del conductor ya que circula por una menor área transversal [6].

El factor del efecto piel viene dado por la relación entre la resistencia DC y la resistencia AC como indica la expresión (2.16) [27].

$$\alpha_{sk} = \frac{R_{AC}}{R_{DC}} - 1 \quad (2.16)$$

2.1.4 Modelos de las Líneas de Transmisión

En el apartado anterior se enunció las fórmulas usadas para obtener los parámetros por fase de una línea de transmisión. Ahora se presentarán modelos de líneas de transmisión basados en su longitud, los cuales nos permitirán calcular los valores de voltaje, corriente y flujo de potencia de la red [14].

Las L/T se dividen en tres clasificaciones según su longitud (ℓ) [23]:

- Línea corta, su longitud no alcanza los 80km.
- Línea media, su longitud se encuentra desde los 80km hasta los 240 km.

- Línea larga, su longitud supera los 240 km.

En este apartado se va a manejar la siguiente nomenclatura:

- ℓ [m], es la longitud de la línea
- $Z = (R+j\omega L) \ell$ [Ω], impedancia serie total por fase
- $Y = (G+j\omega C) \ell$ [S], admitancia paralela total por fase a neutro
- γ es la constante de propagación
- Z_c es la impedancia característica

Se suele representar una línea de transmisión como una red de dos puertos, como la que se muestra en la Figura 2.2.

Donde el voltaje y corriente del extremo emisor son representadas por V_s e I_s respectivamente, mientras que el voltaje y corriente del extremo receptor son representadas por V_R e I_R .

Representado de forma matricial, los voltajes y corrientes de ambos extremos se relacionan como se muestra en (2.17).

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

La matriz ABCD es la que contiene los parámetros de la línea de transmisión, donde A y D están dados en por unidad, B en ohmios y C en siemens. A continuación, la Tabla 2.3 resume la representación gráfica y los parámetros ABCD para cada modelo de línea de transmisión.

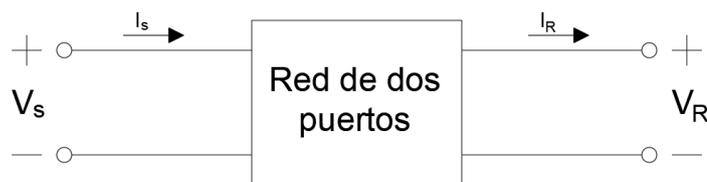


Figura 2.2 Red de dos puertos

Tabla 2.3 Parámetros y Representación Gráfica de los Modelos de L/T [14], [23]

Modelo	Representación gráfica	Parámetros ABCD
Linea corta		$\begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Linea media T		$\begin{bmatrix} 1 + YZ_1 & Z_1 + Z_2 + YZ_1Z_2 \\ Y & 1 + YZ_2 \end{bmatrix}$
Linea media pi		$\begin{bmatrix} 1 + \frac{ZY}{2} & Z \\ Y + \frac{ZY^2}{2} & 1 + \frac{ZY}{2} \end{bmatrix}$
Linea larga pi		$\begin{bmatrix} \cosh(\gamma\ell) & Z_c \sinh(\gamma\ell) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma\ell) & \cosh(\gamma\ell) \end{bmatrix}$

2.1.5 Diagrama de círculo de potencia

El diagrama de círculo permite conocer el flujo de potencia en los extremos de una red de dos puertos mediante las constantes ABCD del sistema, así como los valores de voltaje y corriente. Siendo de mayor interés en este estudio el flujo de potencia en el extremo receptor, la ecuación (2.18) [28] es la que define el procedimiento que se debe de seguir.

$$V_R I_R \angle \theta_R = \left[\frac{|V_S| |I_R|}{|B|} \angle \beta - \delta \right] - \left[\frac{|A| |V_R|^2}{|B|} \angle \beta - \alpha \right] \quad (2.18)$$

Donde:

δ es el ángulo del voltaje en el extremo de envío

α es el ángulo del parámetro A

β es el ángulo del parámetro B

Además de esto, se asume que el ángulo del voltaje en el extremo receptor es 0° , las demás variables ya fueron especificadas en la sección 2.1.4. A continuación, la Figura 2.3 muestra gráficamente el flujo de potencia mediante un diagrama de círculo.

2.2 Aceite Dieléctrico

Mundialmente, los líquidos dieléctricos han sido aplicados a los sistemas de potencia en componentes de transmisión, protección y electrónica [29]. Se conoce como aceite dieléctrico a aquel líquido que es usado en transformadores de potencia debido a sus propiedades aislantes y refrigerantes, con lo cual ayuda a extinguir descargas eléctricas y prevenir sobrecalentamientos en los transformadores [30].

Los aceites dieléctricos más conocidos hoy en día son el mineral, vegetal y nano fluidos, sin embargo, este último aún se encuentra en etapa de investigación por lo que su comercialización se encuentra limitada [29] y por consiguiente no será considerado en esta sección. La Tabla 2.4 muestra la estructura química, así como ciertas propiedades de los aceites naturales y vegetales.

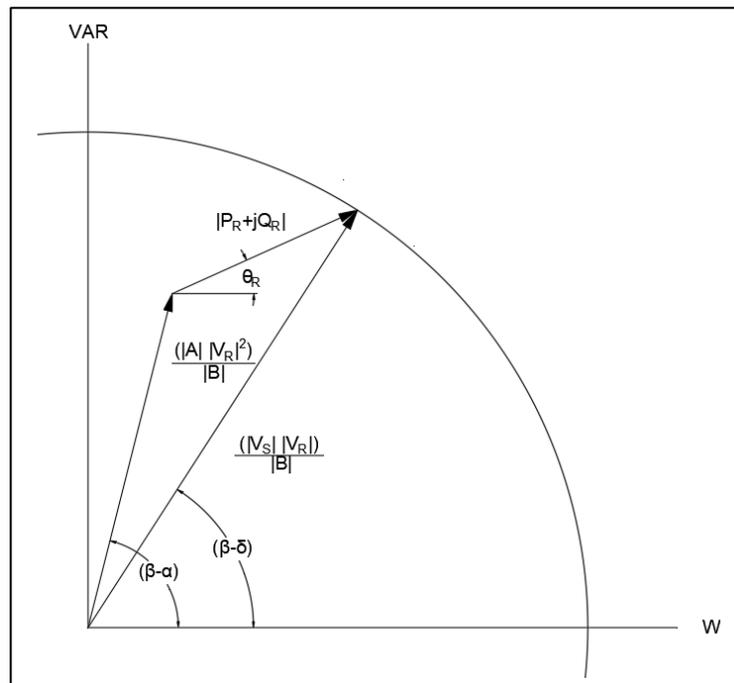
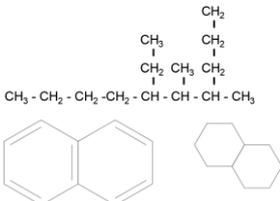
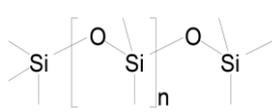
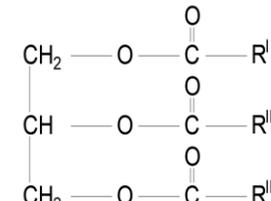


Figura 2.3 Representación gráfica del flujo de potencia

Tabla 2.4: Propiedades de Fluidos Aislantes [31]

Tipo	Aceite mineral	Ester sintético	Ester natural
Componente principal	Mezcla completa de hidrocarburos	Pentaeritritol Ester	Ester basado en plantas
Estructura química			
Fuente	Refinado del petróleo	Origen químico	Extraído de cultivos
Biodegradabilidad	Muy baja	Muy alta	Muy alta
Sensibilidad a la humedad	Rendimiento muy sensible a humedad	Muy alta tolerancia a la humedad	Alta tolerancia a la humedad
Estabilidad a la oxidación	Buena estabilidad	Excelente estabilidad	Buena estabilidad
Punto de inflamación (°C)	160 – 170	>250	>300
Punto de ignición (°C)	170 – 180	>300	>350

Los aceites minerales son derivados del petróleo y ha sido usados desde el siglo XIX, sin embargo, su producción es uno de los refinamientos más costosos de esta sustancia ya que aproximadamente el 3% del petróleo es adecuado para su producción [30]. Por otra parte, los aceites vegetales son aquellos que en su estructura están conformados por ésteres, ya sean naturales o sintéticos [32].

Tomando en cuenta lo anteriormente mencionado y que este estudio plantea aplicar el aceite dieléctrico en Líneas de Transmisión de alta tensión donde la temperatura al manifestarse el efecto corona supera fácilmente los 180°C, se toma como factor principal la inflamabilidad. Además de esto, las condiciones ambientales adversas pueden ocasionar un derrame del aceite en los diversos puntos donde el recubrimiento dieléctrico es aplicado por lo que se considera la biodegradabilidad como criterio secundario de elección [33]. Por estas razones, se utiliza datos del aceite vegetal “Bio Electra” de la empresa REPSOL, el cual cumple con las normas de calidad IEC 62770 y ASTM D6871 [34], cuyas propiedades son mostradas en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Propiedades del Aceite Vegetal "Bio Electra" [35]

Propiedad	Unidad	Valor típico
P. combustión	°C	362
P. inflamación	°C	330
Densidad a 20°C	g/mL	0.91
Viscosidad cinemática a 40°C	cSt	39.2
Punto de vertido	°C	-25
Conductividad térmica a 25°C	W/K m	0.1691
Calor específico a 25°C	J/K g	1.97
Contenido de agua	Mg/kg	150
Rigidez dieléctrica	kV	65
Conductividad eléctrica a 25°C	pS/m	3
Constante dieléctrica a 25°C	--	3.1
Tendencia a gasificarse	µl/min	-31.2

2.3 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics es un programa de simulación interactiva que ofrece a los usuarios la posibilidad de diseñar modelos a conveniencia, de tal manera que se logre encontrar soluciones a problemas científicos y de ingeniería [36]. Ya sea mediante la interfaz de usuario (GUI), COMSOL Compiler™ o COMSOL Server™, es posible realizar estudios estacionarios, transientes, de frecuencia, lineales, no lineales, etc., los cuales serán resueltos mediante métodos numéricos.

2.3.1 Método de Elementos Finitos

El Método de Elementos Finitos (FEM) es un método numérico de aproximación de problemas continuos representados con ecuaciones diferenciales [37]. Consiste en la discretización de un modelo continuo, separándolo en una cantidad finita de elementos geométricos de tal forma que se pueda predecir el comportamiento de una estructura bajo las condiciones deseadas [38].

Cada elemento se analiza de forma individual, sin embargo, un mismo parámetro puede estar relacionado a más de un elemento, por consiguiente, en el método de elementos finitos los parámetros son asociados a los puntos de intersección entre elementos (Nodos). De esta forma el comportamiento de un elemento dependerá de los nodos asociados a este, y el análisis del conjunto de elementos corresponderá a la solución de la problemática.

COMSOL Multiphysics cuenta con diferentes modelos de elementos, entre los cuales se encuentran [36]:

- Elemento de Lagrange
- Elemento Serendipity
- Elemento Argyris
- Elemento Hermite
- Elemento Burbuja
- Elemento Vector
- Elemento de Densidad
- Elemento Divergente
- Elemento de Datos de Gauss

2.3.2 Librería – AC/DC Module

Este módulo cuenta con las herramientas necesarias para poder simular el comportamiento de los materiales ante fenómenos eléctricos, ya que permite asignar y almacenar propiedades electromagnéticas en la base de datos de un material. Estas propiedades son la conductividad y resistividad eléctrica, así como la permitividad y permeabilidad relativa, las cuales serán utilizadas por las interfaces conocidas como “Electric Currents (ec)” y “Magnetic Fields (mf)”.

La base de datos cuenta con información de los elementos más usados en el ámbito eléctrico como lo son el cobre y el Hierro suave, mediante la cual es capaz de calcular propiedades predefinidas como la densidad de flujo remanente, coeficiente de temperatura, entre otros [36].

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

Actualmente, se han propuesto proyectos como el Sistema de Transmisión Sopladora – Cardenillo – Taday 230 kV y el Sistema de Transmisión Ecuador – Perú 500 kV con una fecha prevista de entrada en operación para el segundo semestre 2023 y el primer semestre 2025 respectivamente [4]. Por esta razón, se determinó la necesidad de evaluar la aplicación de un aceite dieléctrico en los cables para mejorar sus parámetros en serie y paralelo [8], de modo que se reduzcan las pérdidas por los efectos descritos en el capítulo anterior.

En este capítulo se presenta a detalle el procedimiento realizado para modelar una línea de transmisión en COMSOL Multiphysics con un recubrimiento del aceite dieléctrico vegetal Bio Electra. Las consideraciones contempladas para este estudio se detallan a continuación:

- Se usó como base los datos de una línea de transmisión existente del SNI.
- Se consideró un recubrimiento uniforme del aceite debido a las fuerzas electroestáticas presentes [12].
- Se despreció la presencia de flechas y tensiones en la L/T.

3.1 Definición del Sistema de Transmisión

Debido a que el Plan Maestro de Electricidad 2018-2027 indica numerosos proyectos de líneas de transmisión de 230 kV y 500 kV, se decidió utilizar ciertos datos de uno de los circuitos que conforman la L/T Paute – Guayaquil como base para el estudio.

Esta línea de transmisión inicia su recorrido en la provincia de Morona-Santiago y continúa por las provincias de Azuay y Cañar, atravesando tanto áreas densamente pobladas como de mediana densidad poblacional, hasta finalizar su recorrido en la provincia del Guayas a 13 km de la ciudad de Guayaquil. En la Tabla 3.1 se pueden apreciar las características de técnicas de esta línea que fueron consideradas para el modelamiento en COMSOL Multiphysics.

Es importante mencionar que a pesar de que la línea tenga una longitud de 182 km y por ende entre dentro del rango de línea media, se desea analizar el efecto

en el modelo de línea larga, razón por la cual se asumirá una longitud de 240 km para el análisis realizado en la sección 4.6.

Las especificaciones técnicas del conductor utilizado para las fases se encuentran en la Tabla 3.2, mientras que las especificaciones técnicas del cable de guarda utilizado se encuentran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.1 Características Técnicas Principales de la L/T Paute-Guayaquil [39]

Características	Unidad	L/T Paute–Guayaquil
Voltaje nominal	kV	230
Número de circuitos	--	2
Capacidad nominal por circuito	MW	250
Factor de potencia	-	0.98
Corriente nominal por fase	A	640.36
Longitud	km	182
Conductor	-	Bluejay 1113 kcmil
Neutro	-	Acero Galvanizado H.S. 3/8"
Conductores por fase	--	1
Tipo de aisladores	--	Suspensión
Material de aisladores	--	Vidrio
Número de aisladores por circuito	--	25050

Tabla 3.2 Especificaciones Técnicas del Conductor Bluejay 1113 kcmil [40]

Características	Unidad	Valor
Trenzado	Al/St	45/7
Diámetro del alambre de aluminio	mm	4
Diámetro del alambre de acero galvanizado	mm	2.66
Sección de aluminio	mm ²	565.48
Sección de acero	mm ²	38.9
Sección total	mm ²	604
Resistencia DC a 20 °C	Ω/km	0.0511
Peso aproximado	kg/km	1870.6

Tabla 3.3 Especificaciones Técnicas del Cable de Guarda [41]

Características	Unidad	Valor
Trenzado	St	6/1
Diámetro del alambre de acero galvanizado	mm	3.05
Sección de cable	mm ²	51.15
Peso del cable	kg/m	0.407

3.2 Diseño de la L/T empleando COMSOL Multiphysics y AutoCAD

COMSOL Multiphysics tiene una variedad de tutoriales a disposición del usuario para que este aprenda a utilizar sus herramientas y se familiarizarse con el software, entre ellas se puede encontrar el diseño detallado de un cable submarino el cual fue utilizado como base para este estudio [42].

A pesar de que se modeló el conductor Bluejay 1113 kcmil que se utiliza en la L/T Paute – Guayaquil, la distancia de separación entre fases que se utilizó en la simulación fue de 0.305 m. Esto se hizo con la finalidad de que los resultados se puedan contrastar con los ofrecidos por el libro “Power System Analysis” [43] donde se tiene los parámetros de capacitancia, resistencia e inductancia utilizando esta separación entre conductores.

3.2.1 Diseño geométrico de la línea de transmisión

El programa COMSOL Multiphysics tiene las herramientas necesarias para diseñar modelos en 2D y 3D, sin embargo, en caso de que el usuario lo prefiera, también es posible importar diseños realizados en otros Softwares como AutoCAD. La única diferencia entre estas dos opciones radica en que los diseños importados se comportan como una sola geometría y no pueden ser modificados individualmente en COMSOL.

En este caso se optó por realizar el diseño en AutoCAD, de tal forma que lo primero a dibujar fue un conductor Bluejay 1113 Kcmil iniciando por los 7 hilos que comprende su alma de acero con un radio de 1.33 mm, como se muestra en la Figura 3.1.

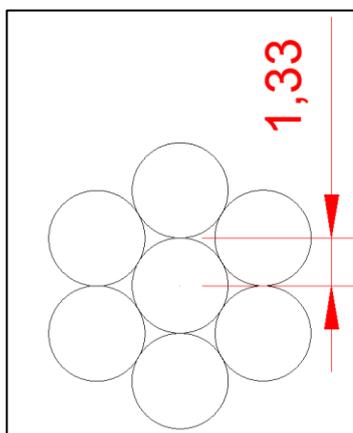


Figura 3.1 Alma de acero modelada en AutoCAD

Posteriormente se añadió los 45 hilos de aluminio, cada uno con un radio de 2mm, dando como resultado el conductor Bluejay 1113 kcmil con un radio exterior de 15.99 mm como muestra la Figura 3.2. A continuación, se dibujó el hilo de guarda que funciona como neutro el cual está conformado por 7 hilos de acero galvanizado, cada uno con un radio de 1.53 mm como muestra la Figura 3.3. Una vez se tiene el modelo del conductor y del neutro se procedió replicar el conductor tanto para la fase B como para la fase C considerando que la línea es soportada por una torre 2B1 (DX) la cual cuenta con dos cables de guarda [44] con un ángulo de protección de 35° y con un distanciamiento de 0.305m entre conductores adyacentes como muestra la Figura 3.4.

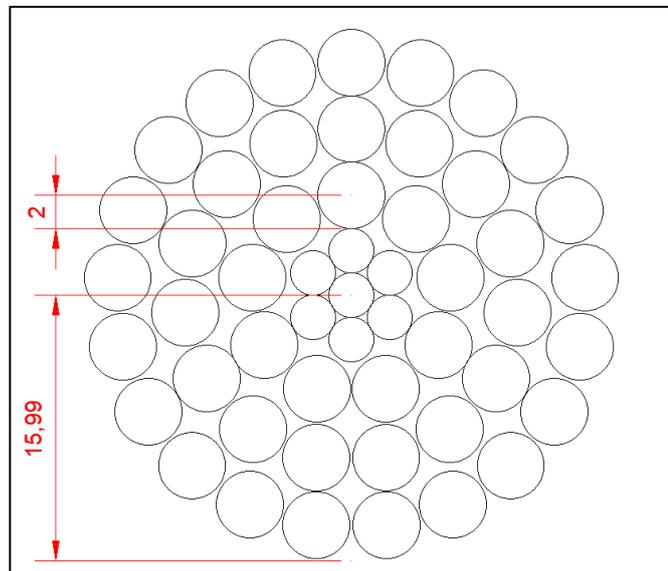


Figura 3.2 Conductor Bluejay modelado en AutoCAD

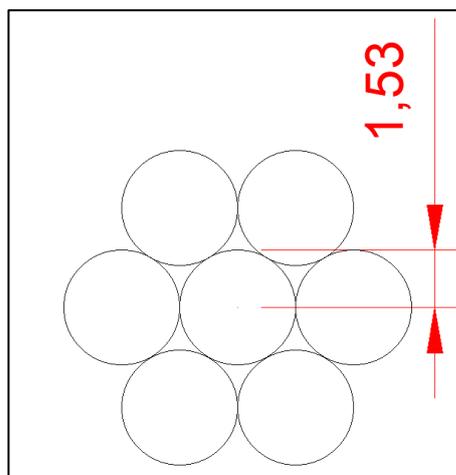


Figura 3.3 Cable de guarda de Acero Galvanizado H.S. 3/8'' modelado en AutoCAD

Finalmente, para terminar el modelado de la geometría en AutoCAD, se procedió a dibujar un círculo con un radio 5 veces mayor al de la distancia entre conductores, el cual en etapas posteriores fue utilizado para representar el dominio Electromagnético y se aprecia en la Figura 3.5.

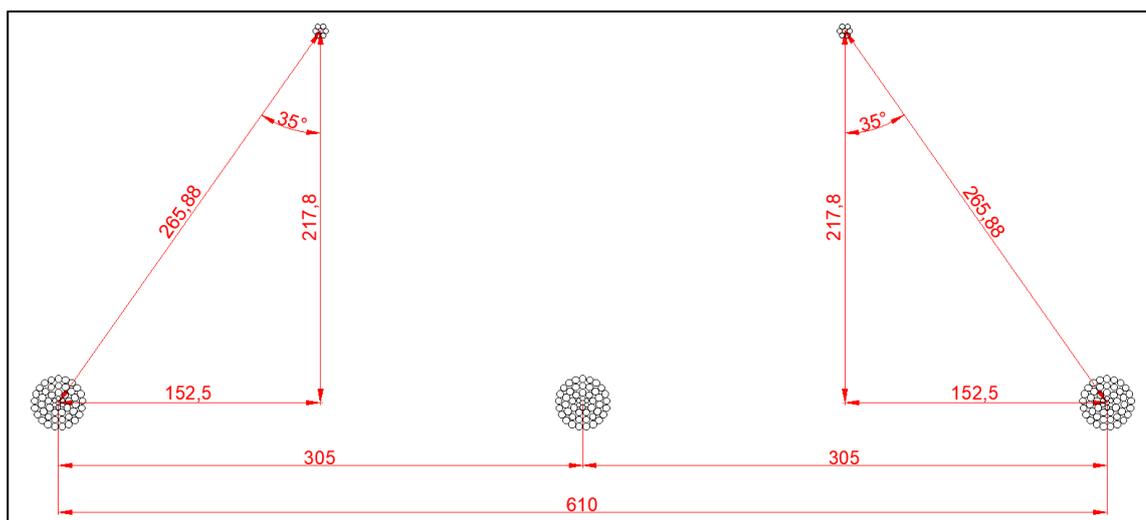


Figura 3.4 Línea de transmisión trifásica de un solo circuito modelada en AutoCAD

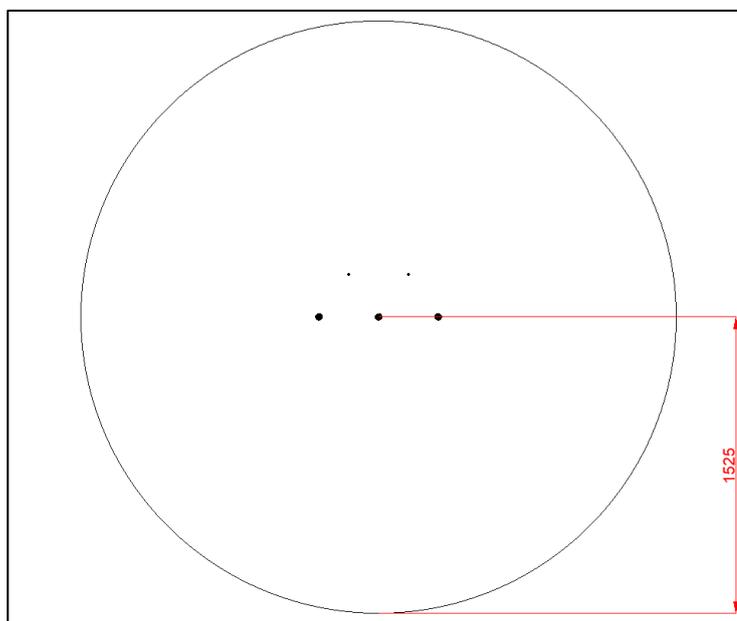


Figura 3.5 Dominio Electromagnético

Una vez se ha terminado el modelo en AutoCAD, se guardó el archivo en formato .dxf y se lo importó a COMSOL Multiphysics como se muestra en la Figura 3.6, obteniendo de esta manera el modelo que muestra la imagen Figura 3.7, asegurándose de especificar que las unidades del diseño son milímetros.

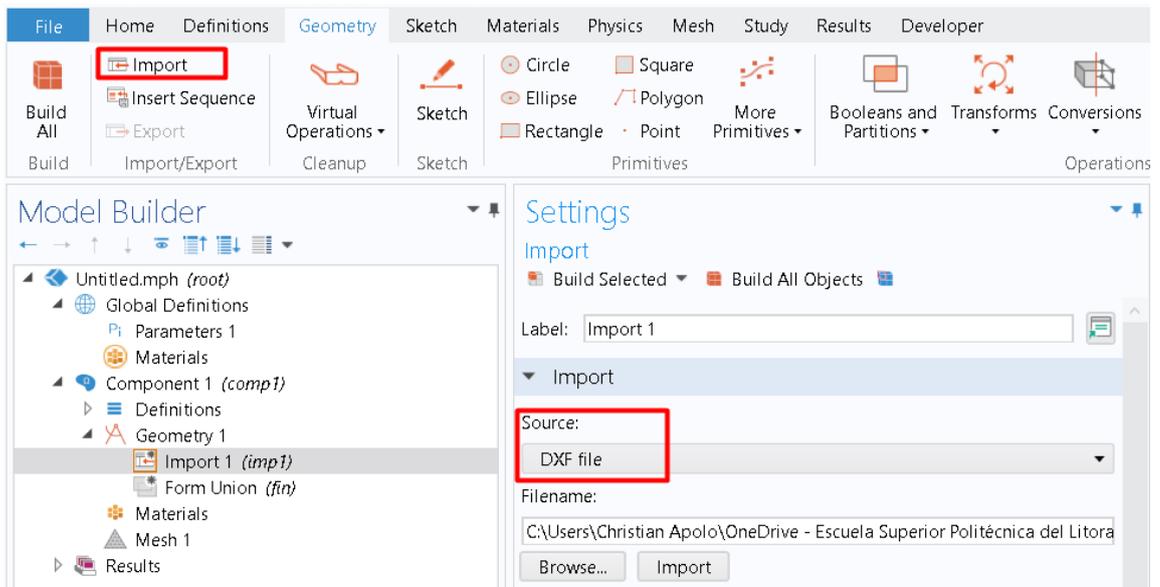


Figura 3.6 Importación del modelo en COMSOL Multiphysics

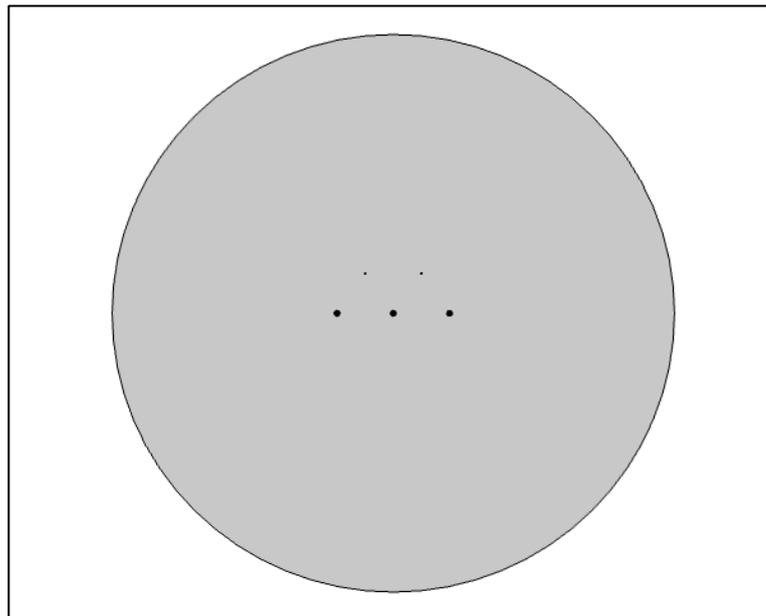


Figura 3.7 Modelo de L/T en COMSOL Multiphysics

3.2.2 Propiedades Eléctricas de los Materiales

Una vez ya se importó el modelo de la Línea se tuvo que crear una lista con los respectivos valores de los parámetros eléctricos a utilizar, tanto de los materiales como del sistema, las cuales se encuentran en la Tabla 3.4.

Es importante mencionar que dado que el conductor es un ACSR las propiedades del aluminio corresponden a la aleación 1350 – H19, de igual manera que la corriente nominal “I₀” utilizada es la que se encuentra indicada en la la Tabla 3.1. Para asignar las propiedades correspondientes a cada elemento se procedió a crear 2 materiales en blanco, denominados: Aluminio 1350 – H19 y Acero, donde se asignaron los parámetros a los 45 hilos de aluminio y los 7 hilos del alma de acero de cada fase y neutro respectivamente. De igual manera se importó y asignó el material “Air” de la librería de COMSOL a todos los dominios restantes, de tal forma que se simuló el aire alrededor de la línea de transmisión. Esto puede verse representado en la Figura 3.8.

Tabla 3.4 Propiedades Físicas de los Materiales

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
f0	60[Hz]	60 Hz	Frecuencia de operación
w0	$(2*\pi*f0[1/Hz])$ [rad/s]	376.99 rad/s	Frecuencia angular
V0	230[kV]/sqrt(3)	1.3279E5 V	Voltaje de fase a tierra (Amplitud)
I0	640.36[A]*sqrt(2)	905.61 A	Corriente nominal (Amplitud)
M_Al	1	1	Permeabilidad relativa del aluminio
M_Steel	1	1	Permeabilidad relativa del acero
C_Al	3.53356e7[S/m]	3.53356e7[S/m]	Conductividad eléctrica del aluminio
C_Steel	1.46e6[S/m]	1.46e6[S/m]	Conductividad eléctrica del acero
C_Bio	3e-12[S/m]	3e-12[S/m]	Conductividad eléctrica del aceite dieléctrico
Ep_Al	1	1	Permitividad relativa del aluminio
Ep_Steel	1	1	Permitividad relativa del acero
Ep_Bio	3.1	3.1	Permitividad relativa del aceite dieléctrico

3.2.3 Mallado

Como se explicó en la sección 2.3.1, COMSOL Multiphysics utiliza el método de elementos finitos para obtener los resultados de sus simulaciones, y dependiendo del grosor del mallado las respuestas serán más o menos exactas. Debido a esto, es importante especificar este parámetro en la simulación, en este caso todas las simulaciones se realizaron utilizando un mallado “Fino” como se observa en la Figura 3.9.

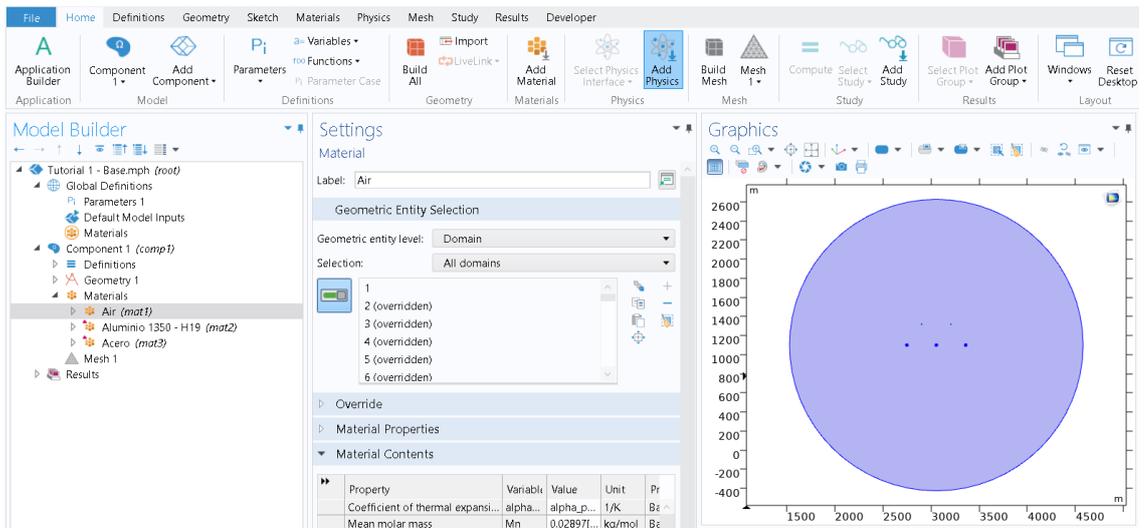


Figura 3.8 Materiales utilizados para la simulación de la línea de transmisión

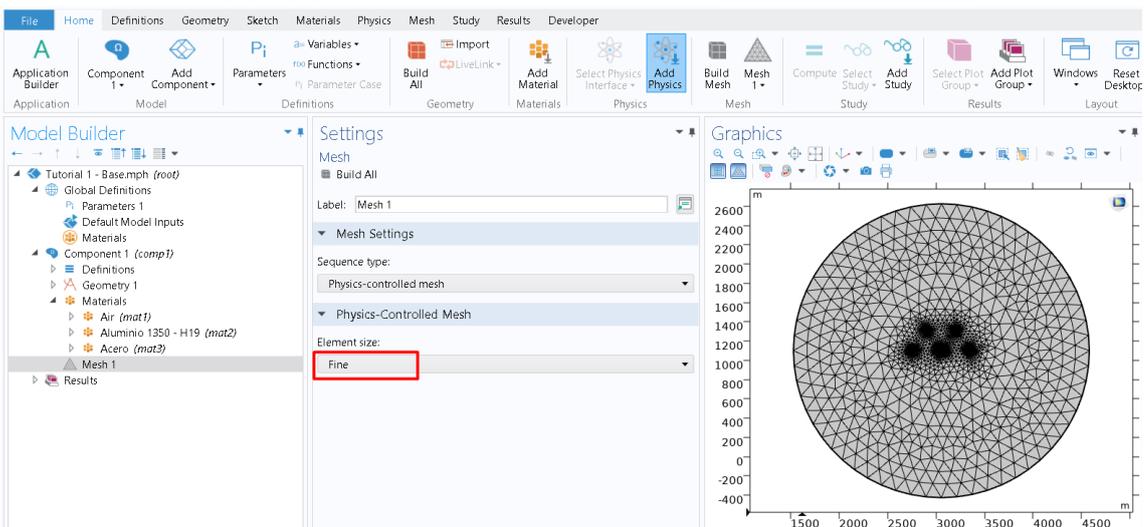


Figura 3.9 Mallado utilizado para la simulación

3.2.4 Recubrimiento con Aceite dieléctrico

Para poder evaluar el efecto de un recubrimiento dieléctrico se analizó diferentes escenarios variando el grosor del recubrimiento eléctrico desde 0.5 mm hasta 5 mm en pasos de 0.5 mm. De esta manera se siguió todos los pasos anteriores con la diferencia de que en el modelo de AutoCAD se añadió un círculo concéntrico al conductor que representará el recubrimiento dieléctrico. La Figura 3.10 muestra un ejemplo donde se agregó una circunferencia de radio igual a 20.99 mm que representa un recubrimiento con aceite dieléctrico de 5 mm de espesor.

Un modelo similar a este conductor es el que se utilizó para cada fase durante los estudios con el aceite dieléctrico, los pasos y consideraciones al importar el archivo se mantuvieron iguales a los ya mencionados. Con respecto a la asignación de propiedades, se creó un tercer material denominado “Bio Electra” como se muestra en la Figura 3.11, al cual se le asignó las propiedades indicadas en la Tabla 2.5.

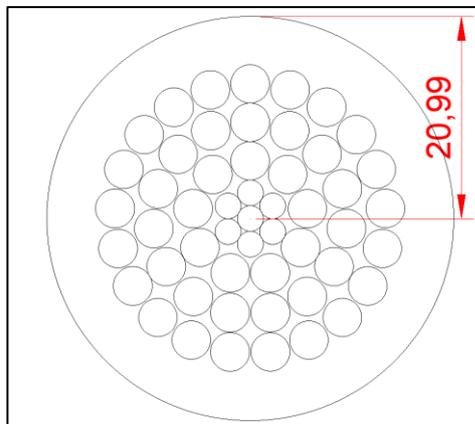


Figura 3.10 Conductor Bluejay con aceite dieléctrico modelado en AutoCAD

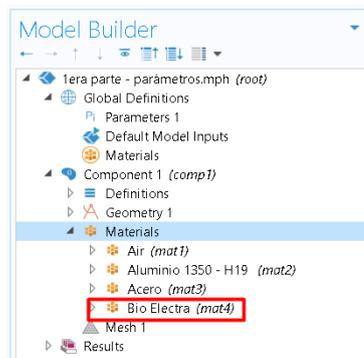


Figura 3.11 Material con las propiedades del Aceite vegetal Bio Electra

3.3 Cálculo de los parámetros eléctricos de la línea de transmisión

3.3.1 Cálculo de capacitancia y conductancia

Para poder realizar el cálculo de la capacitancia y conductancia mediante COMSOL Multiphysics es necesario cargar la física adecuada al modelo de línea de transmisión que se creó en el subcapítulo anterior. La física que permite realizar el estudio de cargas se denomina “Electric Currents (ec)” la cual se encuentra en el módulo AC/DC y se aplicó a todo elemento que se encuentra dentro del dominio electromagnético, esto se puede observar en la Figura 3.12.

Posteriormente, dentro de la física de corrientes eléctricas se agregó diferentes componentes que ayudaron a representar de mejor manera el sistema. Estos componentes se muestran en la Figura 3.13 y están basados en los siguientes criterios.

- Se estableció como tierra a los límites del dominio electromagnético mediante el componente “Ground”
- Se definió una ley de conservación de corriente que incluya todo elemento metálico de las líneas de transmisión, es decir fases y neutros mediante el componente “Current Conservation 2”
- Se especificó el voltaje de cada fase considerando secuencia positiva mediante los diferentes componentes de tipo terminal.

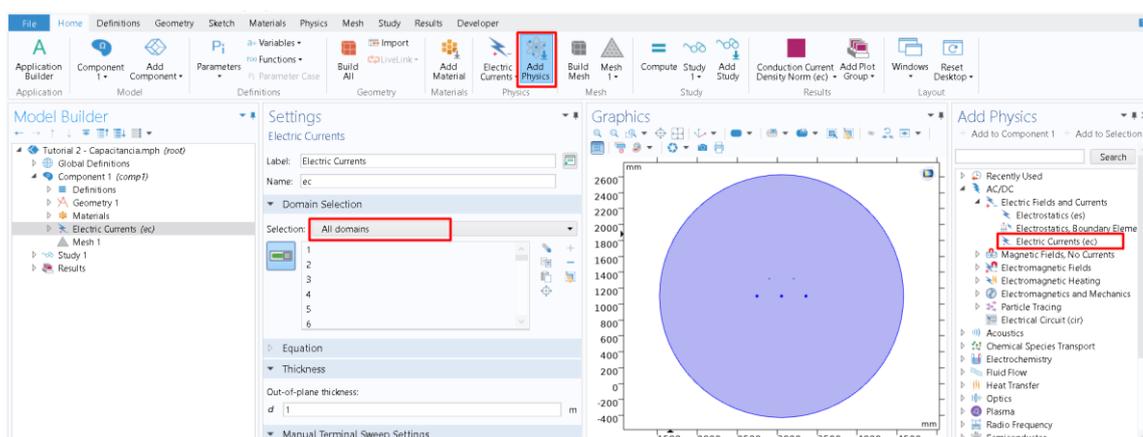


Figura 3.12 Física utilizada para el estudio de capacitancia y conductancia

Una vez se definió los dominios de la física y sus componentes, se tuvo que especificar el estudio a realizar. Debido a que la capacitancia y conductancia son componentes que dependen de la frecuencia, entonces se realizó un estudio en el dominio de la frecuencia como se muestra en la Figura 3.14. Después de haber especificado “fo” como la frecuencia a la que se va a realizar el estudio y darle clic a la opción de “compute”, aparece el error que se muestra en la Figura 3.15. A este error se lo conoce como “Problema mal planteado” y es indiferente del software utilizado, es decir que si se hubiera modelado la línea en algún otro programa de simulación también habría aparecido. La solución radica reducir la conductividad del aire a un valor de 5 [S/m], de tal forma que el programa funcione con normalidad y proporcione los resultados que muestra la Tabla 3.5.

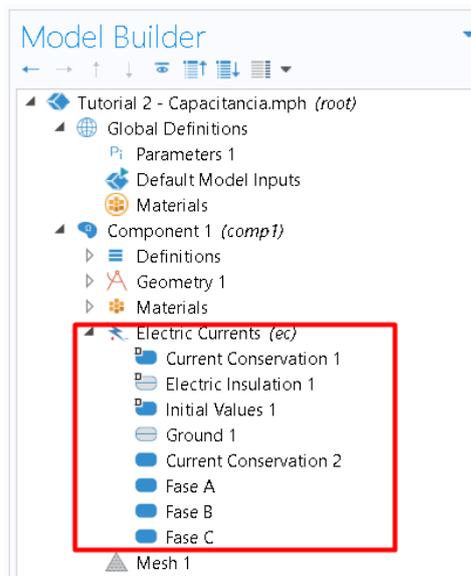


Figura 3.13: Asignación de componentes de la física “Electric Currents (ec)”

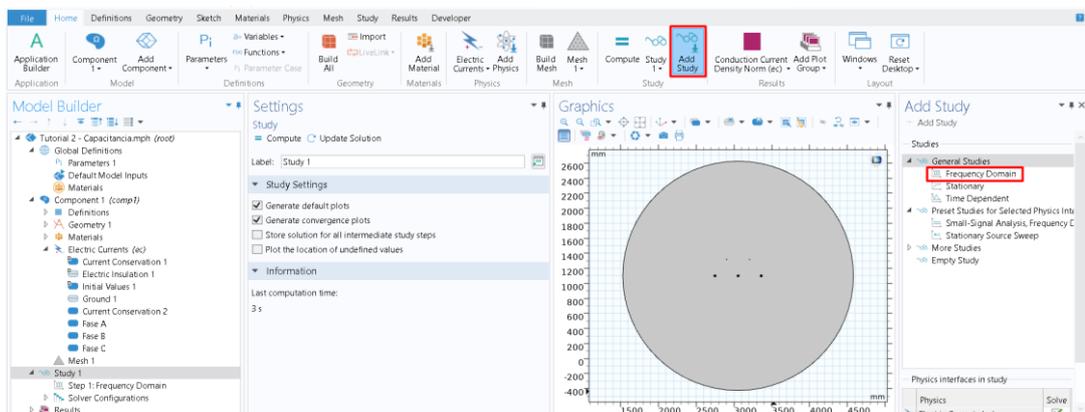


Figura 3.14 Estudio en el dominio de la frecuencia

El mismo procedimiento se realizó con los modelos en donde los conductores de cada fase tienen un recubrimiento dieléctrico de 0.5 mm a 5 mm, continuando el ejemplo anterior la Tabla 3.6 presenta los valores del parámetro paralelo obtenido considerando un recubrimiento de 5 mm, los resultados de los demás escenarios se mostrarán y analizarán en el siguiente capítulo.

3.3.2 Cálculo de Inductancia y Resistencia

Para el cálculo de la Inductancia y Resistencia mediante COMSOL Multiphysics es necesario utilizar una física distinta a la usada en el apartado anterior. En este caso se usa la física “Magnetic Fields (mf)” del módulo AC/DC, la cual se aplica a todo el dominio electromagnético como se observa en Figura 3.16.

De igual manera al caso anterior, se procedió a agregar diferentes componentes dentro de la física de Campos Magnéticos, los cuales permitieron modelar de mejor manera el sistema. La Figura 3.17 muestra estos componentes, los cuales ayudan a detallar la corriente que experimenta cada fase considerando un sistema en secuencia negativa.

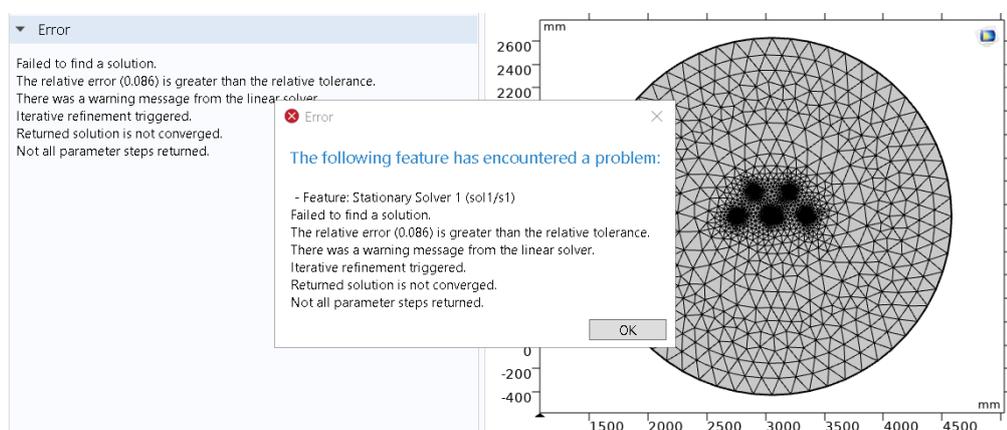


Figura 3.15 Error mostrado por COMSOL Multiphysics

Tabla 3.5 Parámetro Paralelo por Fase a una Frecuencia de 60 Hz

Frecuencia [Hz]	P. Paralelo de Fase A [$\mu\text{F}/\text{km}$]	P. Paralelo de Fase B [$\mu\text{F}/\text{km}$]	P. Paralelo de Fase C [$\mu\text{F}/\text{km}$]	Capacitancia Teórica [$\mu\text{F}/\text{km}$]
60	0.017114	0.019825	0.017112	0.0488325

Tabla 3.6 Parámetro Paralelo por Fase Considerando 5mm de Aceite Dieléctrico

Frecuencia [Hz]	P. Paralelo de Fase A [$\mu\text{F}/\text{km}$]	P. Paralelo de Fase B [$\mu\text{F}/\text{km}$]	P. Paralelo de Fase C [$\mu\text{F}/\text{km}$]
60	0.018242	0.021364	0.018231

Dado que tanto la resistencia AC como la inductancia de un conductor dependen de la frecuencia, se realiza un estudio en el dominio de la frecuencia como en el caso de la capacitancia. Posteriormente, se utilizó la herramienta de “Evaluación Global” que muestra la Figura 3.18 para obtener los valores de resistencia e inductancia de cada conductor que se encuentran en la Tabla 3.7.

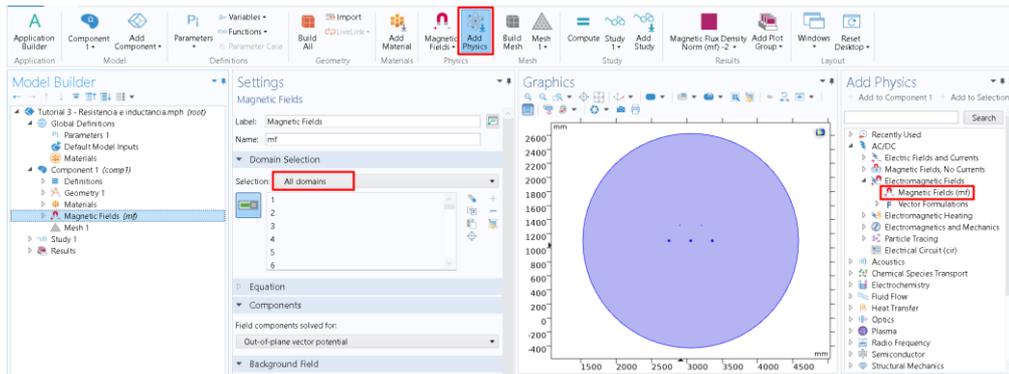


Figura 3.16 Física utilizada para el estudio de inductancia y resistencia

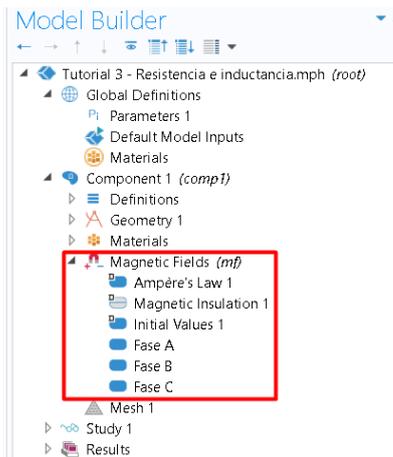


Figura 3.17 Asignación de componentes de la física “Magnetic Fields (mf)”

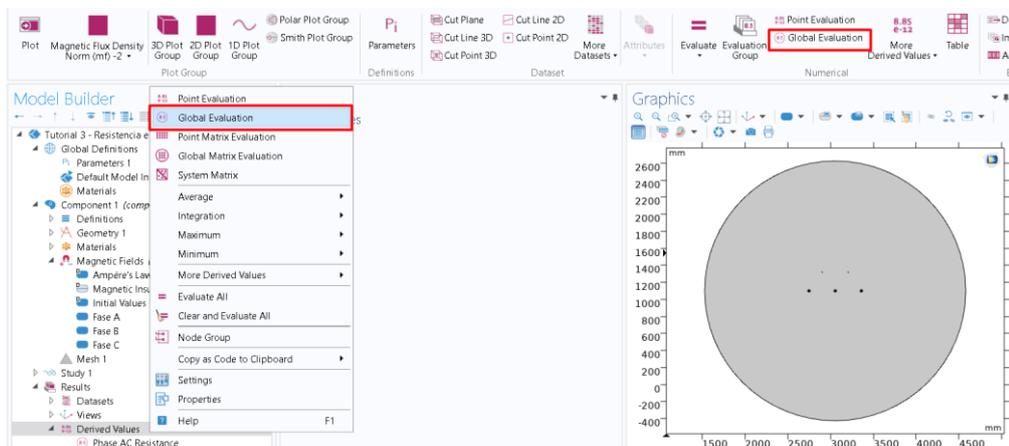


Figura 3.18 Herramientas utilizadas para el cálculo de inductancia y resistencia

El mismo procedimiento se realizó con los modelos en donde los conductores de cada fase tienen un recubrimiento dieléctrico de 0.5 mm a 5 mm, continuando el ejemplo anterior la Tabla 3.8 presenta los valores de resistencia e inductancia obtenidas considerando un recubrimiento de 5 mm, mientras que los resultados de los demás escenarios se mostrarán y analizarán en el siguiente capítulo.

3.4 Pérdidas de Potencia usando COMSOL Multiphysics

Para conocer las pérdidas de potencia en los conductores, así como las que se generan en el neutro, se utilizó la opción “Integración en superficie” de la pestaña “resultados” como se muestra en la Figura 3.19.

Para obtener los valores de pérdidas independientes entre fase y neutro se modificó el dominio de integración, los valores obtenidos se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.7 Inductancia y Resistencia de Cada Fase a una Frecuencia de 60 Hz.

Frecuencia [Hz]	Resistencia por fase [mΩ/km]	Resistencia teórica por fase [mΩ/km]	Inductancia por fase [mH/km]	Inductancia teórica por fase [mH km]
60	0.051756	0.053511	0.673350	0.673225

Tabla 3.8 Parámetros Serie por Fase Considerando 5 mm de Aceite Dieléctrico

Frecuencia [Hz]	Resistencia por fase [mΩ/km]	Inductancia por fase [mH/km]
60	0.051747	0.67338

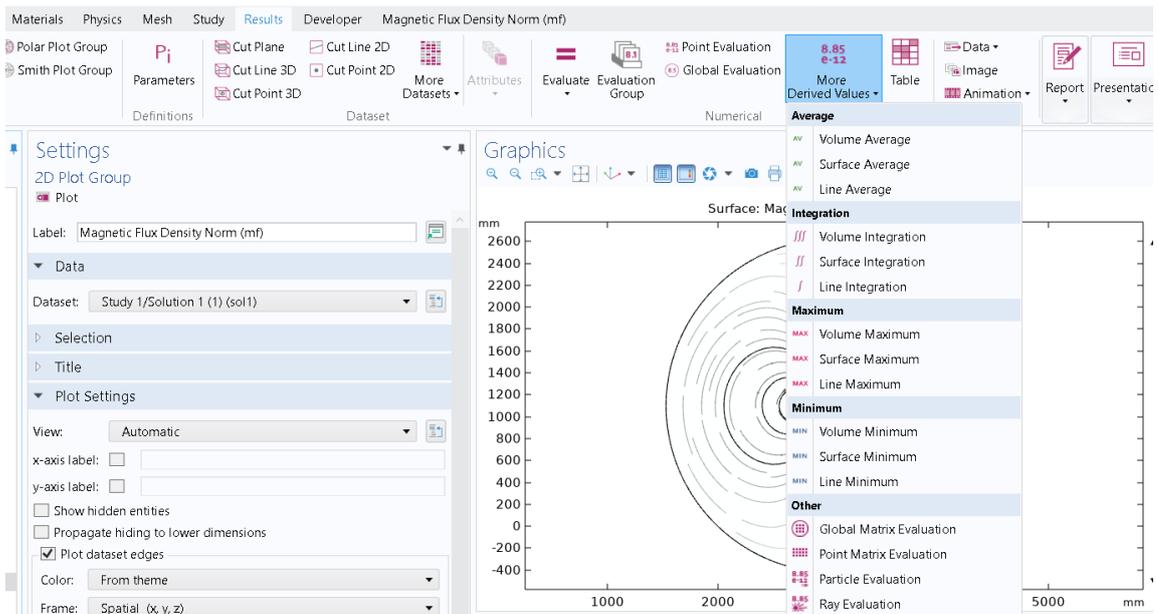


Figura 3.19 Integración superficial para el cálculo de pérdidas

El mismo procedimiento se realizó con los modelos en donde los conductores de cada fase tienen un recubrimiento dieléctrico de 0.5 mm a 5 mm, continuando el ejemplo anterior la Tabla 3.10 presenta los valores de pérdidas de potencia en fases y neutro obtenidas considerando un recubrimiento de 5 mm, mientras que los resultados de los demás escenarios se mostrarán y analizarán en el siguiente capítulo.

3.5 Efectos sobre Líneas de Transmisión

3.5.1 Efecto Aislador

El efecto aislador a un nivel de tensión de 230 kV se lo calculó utilizando la ecuación (2.12), de tal forma que los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo.

3.5.2 Efecto Corona usando COMSOL Multiphysics

Para poder analizar el comportamiento de los parámetros de la línea de transmisión ante la presencia del Efecto Corona y elegir el grosor ideal del recubrimiento dieléctrico, se realizaron tres simulaciones las cuales se detallan a continuación:

- Control, donde se consideró una distribución uniforme del potencial eléctrico en la sección transversal del conductor
- Efecto corona, se asignó ligeras variaciones al voltaje dependiendo de la capa del conductor como se muestra en la Figura 3.20. Es importante mencionar que la capa externa formada por 21 hilos de aluminio será la que experimente la menor tensión (1 p.u.) y aumentará levemente a medida que se acerque hacia las capas internas, de manera que la capa intermedia formada por 15 hilos de aluminio experimenta un voltaje de 1.02 p.u. y las tres capas internas 1.05 p.u.

Tabla 3.9 Pérdidas de Potencia en Fases y Neutro

Pérdidas de potencia en las fases [kW/km]	Pérdidas de potencia en el neutro [kW/km]
63.538	0.13110

Tabla 3.10 Pérdidas de Potencia de la L/T Considerando Recubrimiento Dieléctrico

Pérdidas de potencia en las fases [kW/km]	Pérdidas de potencia en el neutro [kW/km]
63.527	0.13131

- Efecto corona y recubrimiento dieléctrico, se hacen las mismas consideraciones que el escenario anterior, sin embargo, los conductores se encuentran recubiertos por una capa de aceite dieléctrico, donde nuevamente se analizará escenarios donde el recubrimiento varíe de 0.5 mm a 5 mm en pasos de 0.5 mm.

Una vez elegido el grosor a usar para el recubrimiento dieléctrico, se realizó un análisis térmico básico de la línea debido a que la temperatura del conductor es una variable que se encuentra fuertemente relacionada con el Efecto Corona. Para ello primero se creó un espacio lleno de aire denominado "Dominio térmico" al cual se le asignó la física "Heat Transfer in Solids (ht)" del módulo "Heat Transfer" como se muestra en la Figura 3.21.

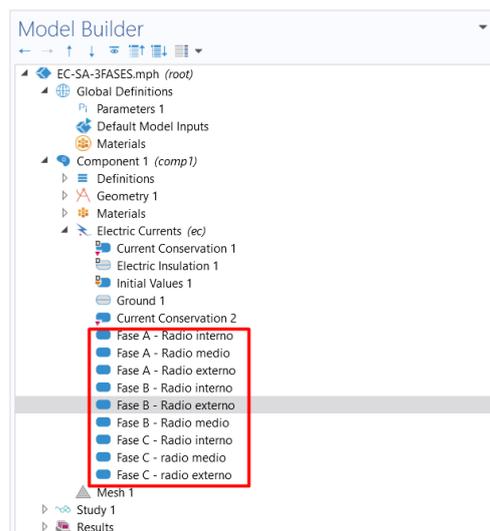


Figura 3.20 Asignación de variaciones de voltaje a las capas del conductor

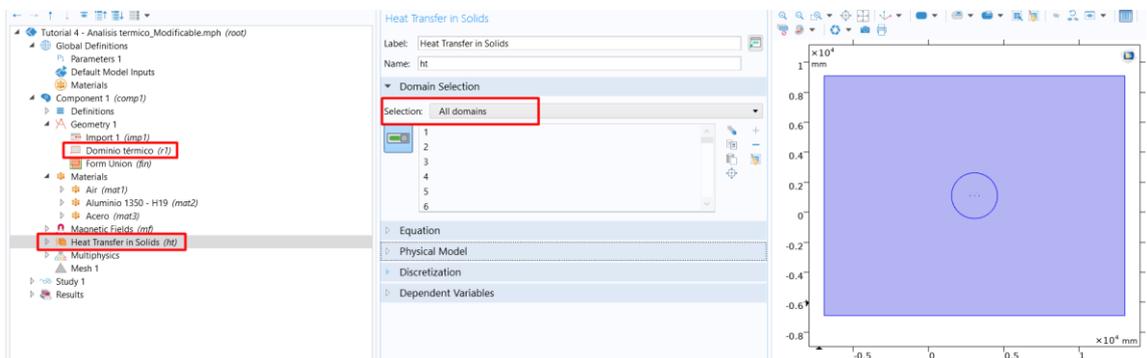


Figura 3.21 Dominio térmico y física "Heat Transfer in Solids (ht)"

En la Figura 3.22 se puede apreciar que dentro de la física “Heat Transfer in Solids (ht)” se especificó una temperatura de 20 °C (293.15 K) en los límites del espacio, de tal forma que actúen como punto de referencia.

Esto se realizó tanto a la simulación de control como a la que considera el recubrimiento con aceite dieléctrico.

3.5.3 Efecto Piel usando COMSOL Multiphysics

Para analizar el comportamiento del Efecto piel ante el recubrimiento de aceite dieléctrico, se simuló la densidad de corriente eléctrica en la sección transversal del conductor utilizando las herramientas proporcionadas por COMSOL Multiphysics, las cuales se observan en Figura 3.23.

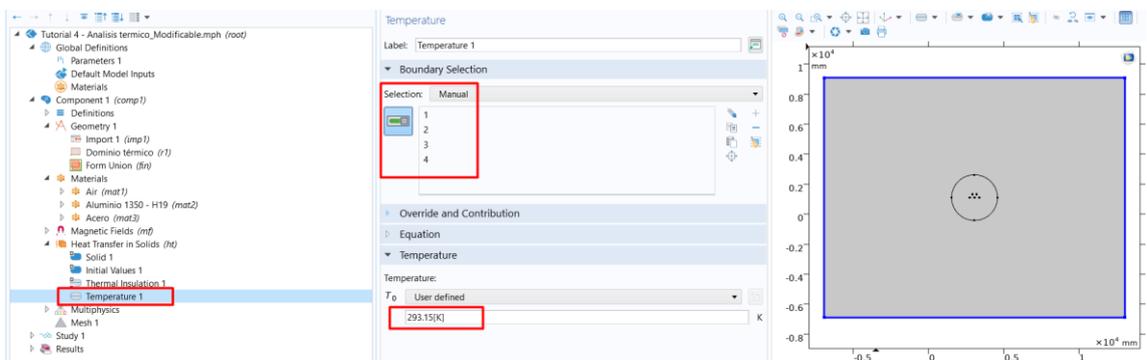


Figura 3.22 Configuración de la temperatura ambiente circundante

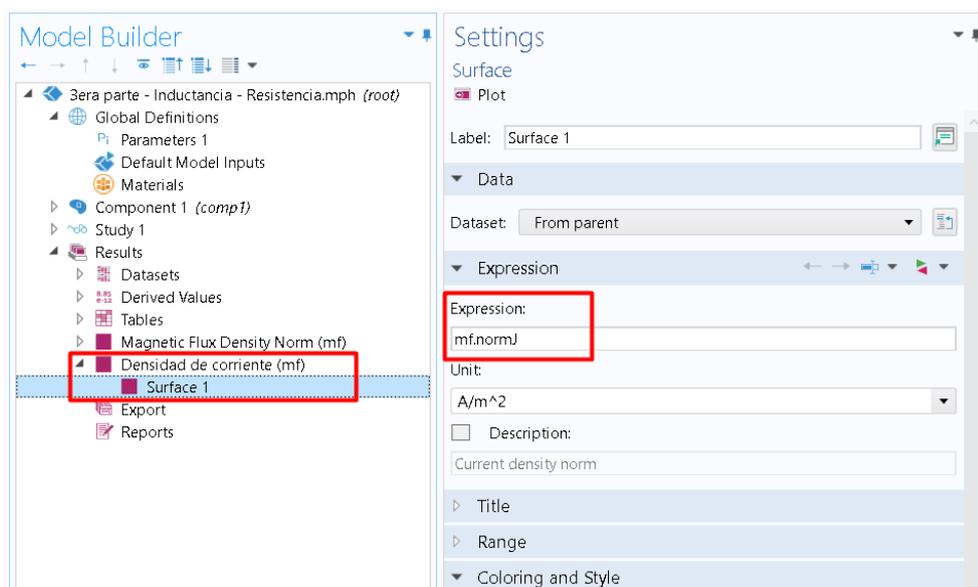


Figura 3.23 Expresión para la representación gráfica de la densidad de corriente

Dado que el Efecto piel depende de la frecuencia del sistema, se hizo un barrido con frecuencias iguales a 60 Hz, 240 Hz y 500 Hz. Este procedimiento se realizó tanto al escenario de control donde solo se considera la línea de transmisión, así como al escenario elegido donde se aplica un recubrimiento de aceite dieléctrico a cada conductor.

3.6 Modelamiento de la Línea de Transmisión como red de dos puertos

Una vez se haya elegido el diseño de la línea de transmisión que presente menores pérdidas, se realizó una representación del sistema como una red de dos puertos. Para este apartado se tuvo que considerar que existen diferentes modelos que pueden ser usados, debido a que la Línea de L/T Paute – Guayaquil tiene una longitud de 180 km como indica la Tabla 3.1 se debería optar por el modelo de línea media, sin embargo, se desea analizar el efecto en el modelo de línea larga, razón por la cual se asumirá una longitud de 240 km para el análisis de la sección 4.6, modelo que se muestra en la Figura 3.24. Esto se debe a que este tipo de modelos mantiene un rango de exactitud considerablemente alto para líneas cuya longitud sea mayor o igual a 240 km. Se realizó el modelo considerando los parámetros serie y paralelo de la línea de transmisión, los cuales fueron obtenidos siguiendo lo explicado en la sección 3.3. Los valores de los parámetros ABCD, así como el diagrama de círculo utilizado para el análisis del sistema se presentan en el siguiente capítulo.

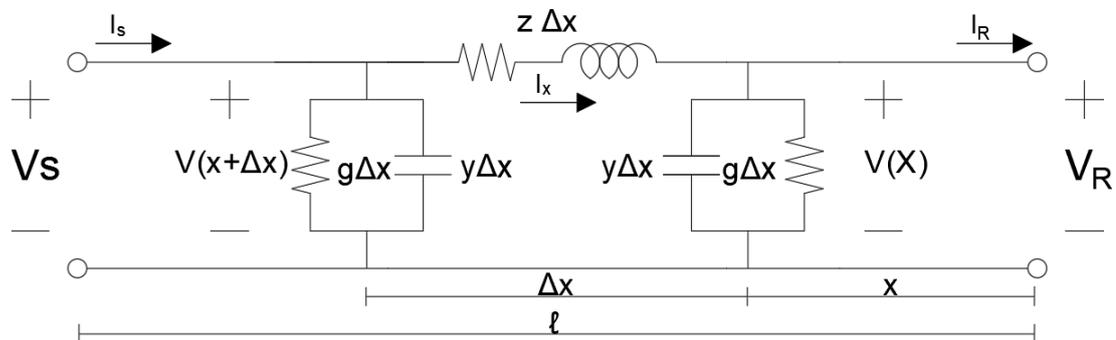


Figura 3.24 Modelo de línea larga sin pérdidas

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para el estudio de los parámetros de la línea de transmisión se buscó determinar el grosor ideal que el recubrimiento dieléctrico debe de tener de tal forma que se exista un equilibrio costo-beneficio. Para esto se partió desde un escenario de control, donde se comprobó que los parámetros serie y paralelo obtenidos en COMSOL Multiphysics se asemejen a los especificados en la ficha técnica del conductor para una distancia de un pie entre fases adyacentes. Posteriormente se plantearon diferentes escenarios donde se analizó cómo dichos parámetros se vieron afectados al variar el grosor del recubrimiento eléctrico desde 0.5 mm hasta 5 mm en pasos de 0.5 mm. De igual manera al elegir el grosor ideal se efectuó un análisis térmico simple y un barrido de frecuencia para estudiar el efecto del recubrimiento dieléctrico en presencia del efecto corona y piel respectivamente. Además de esto, se utilizaron datos de la línea de transmisión Paute – Guayaquil como caso de estudio para obtener los parámetros ABCD de la línea y realizar el respectivo análisis de potencia.

4.1 Análisis de los parámetros eléctricos del conductor

4.1.1 Escenario de control

Si bien se intentó recrear el mismo escenario con el cual “Power System Analysis” [43] obtuvo los valores teóricos, la Tabla 4.1 muestra que se alcanzó un porcentaje de error de hasta 65% en cuanto al parámetro paralelo, mientras que para la resistencia e inductancia por fase el porcentaje de error alcanzó 3.27% y 0.02% respectivamente.

Tabla 4.1: Parámetros Eléctricos Experimentales y Teóricos del Caso de Control

Parámetro eléctrico	Valores experimentales	Valores teóricos	Porcentaje de error
P. paralelo de fase A [$\mu\text{F}/\text{km}$]	0.017114	0.0488325	64.95%
P. paralelo de fase B [$\mu\text{F}/\text{km}$]	0.019825	0.0488325	59.40%
P. paralelo de fase C [$\mu\text{F}/\text{km}$]	0.017115	0.0488325	64.95%
Resistencia por fase [Ω/km]	0.051756	0.0535110	3.27%
Inductancia por fase [mH/km]	0.673350	0.6732250	0.02%

Este porcentaje de error tan elevado en el parámetro paralelo se debe a que los valores teóricos y experimentales son obtenidos bajo diferentes consideraciones. Los valores teóricos solo consideran la capacitancia y son obtenidos mediante las fórmulas de la sección 2.1.2, por otra parte, COMSOL Multiphysics calcula los valores del parámetro paralelo utilizando la matriz admitancia del sistema, la cual considera tanto la capacitancia como la conductancia, dando como resultado un valor experimental que dista en gran medida del teórico. De igual manera, es importante mencionar que los resultados experimentales indican que el valor del parámetro paralelo no es igual para las tres fases del sistema, y esto se debe a que no se está considerando el efecto de la transposición de líneas. Al modelar el sistema en el programa se basó en una línea de transmisión soportada por una torre 2B1 (DX) la cual cuenta con dos cables de guarda [44], en este caso con un ángulo de protección de 35° como se observa en la Figura 3.4. Esto ocasionó que los campos eléctricos entre las fases A y C sean simétricos y diferentes al que experimenta la fase B como se observa en la Figura 4.1, lo cual repercutió directamente sobre el valor experimental del parámetro paralelo en cada fase. Los resultados experimentales obtenidos de la resistencia e inductancia son muy cercanos a los valores teóricos, a pesar de esto, hay una diferencia notable al comparar un error del 0.02% con uno de 3.27%. Este “elevado” porcentaje de error que experimenta la resistencia en comparación con la inductancia se debe a que no se simuló el trenzado de los hilos del conductor, lo cual como indica la sección 2.1.2.1 eleva su resistencia total aproximadamente un 2%.

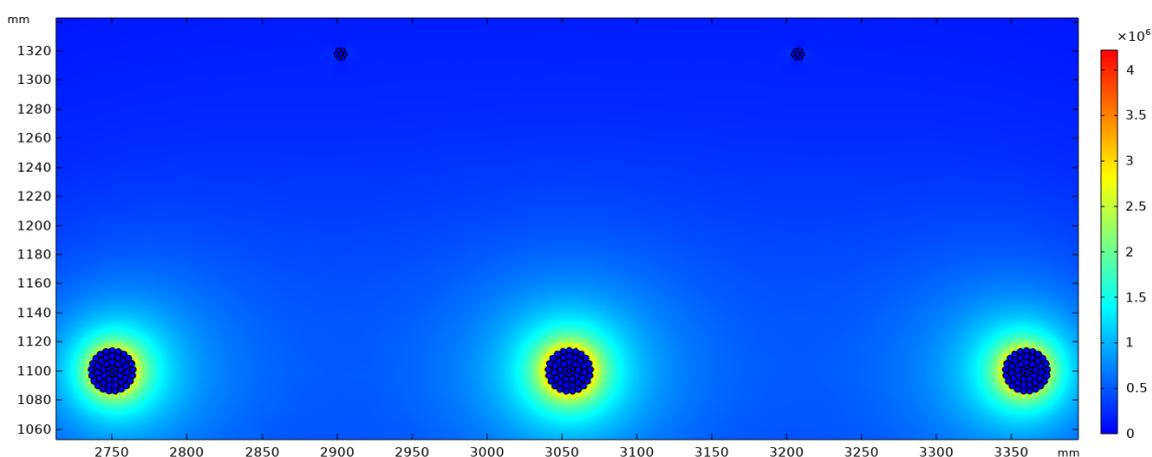


Figura 4.1 Campo eléctrico que experimentan los conductores de la L/T

4.1.2 Escenario con recubrimiento dieléctrico

Para evaluar el comportamiento de los parámetros eléctricos al aplicar el recubrimiento dieléctrico se planteó diferentes escenarios donde se varió el grosor del recubrimiento desde 0.5 mm hasta 5 mm en pasos de 0.5 mm, los resultados obtenidos pueden se muestran en la Tabla 4.2. Estos muestran que el recubrimiento dieléctrico no tiene efecto sobre los parámetros de inductancia y resistencia, lo cual concuerda con lo estipulado en el capítulo 2 ya que no se está variando ni el material ni el área por la cual circula la corriente. Por otra parte, la correlación de 0.9987 que se muestra en la Figura 4.2 indica que el parámetro paralelo tiene una fuerte relación lineal positiva con el grosor de recubrimiento, ya que si uno aumenta el otro también lo hace. La razón por la que el parámetro paralelo se ve afectado y el serie no, es que los principales propósitos del recubrimiento es mantener el campo eléctrico encerrado y actuar como refrigerante, lo cual afecta a la capacitancia y conductancia respectivamente.

Tabla 4.2 Efecto del Recubrimiento Dieléctrico en los Parámetros Serie y Paralelo

Grosor del recubrimiento dieléctrico [mm]	Parámetro paralelo fase A, B y C [$\mu\text{F}/\text{km}$]	Resistencia [$\text{m}\Omega/\text{km}$]	Inductancia [mH/km]
0.5	0.017295 0.020066 0.017285	51.747	0.67338
1.0	0.017407 0.020219 0.017397	51.747	0.67338
1.5	0.017547 0.020410 0.017537	51.747	0.67338
2.0	0.017625 0.020517 0.017615	51.747	0.67338
2.5	0.017732 0.020663 0.017721	51.747	0.67338
3.0	0.017836 0.020806 0.017826	51.747	0.67338
3.5	0.017940 0.020948 0.017929	51.747	0.67338
4.0	0.018042 0.021089 0.018031	51.747	0.67338
4.5	0.018142 0.021227 0.018131	51.747	0.67338
5	0.018242 0.021364 0.018231	51.747	0.67338

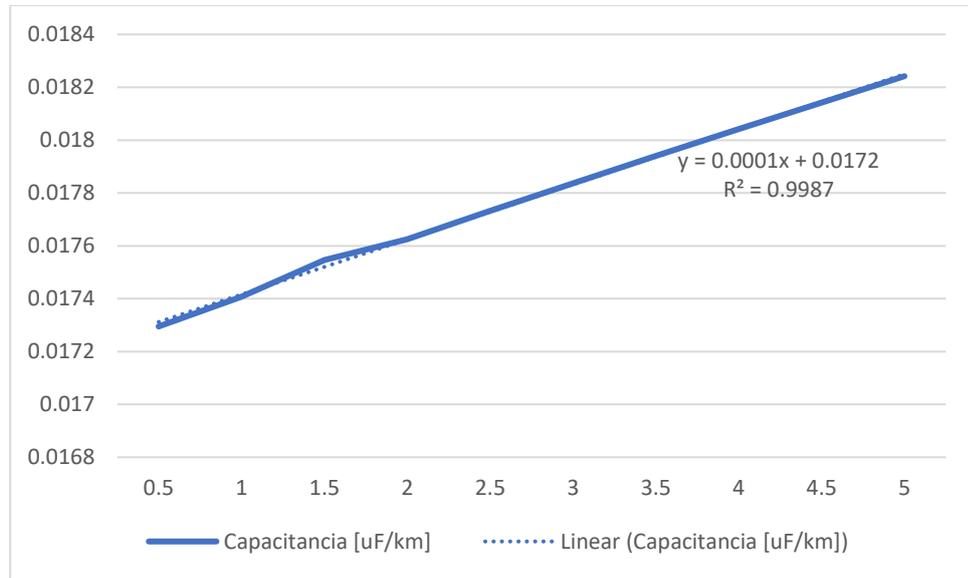


Figura 4.2 Capacitancia vs grosor del recubrimiento dieléctrico

4.2 Análisis de las pérdidas de potencia en el conductor y neutro

Para poder analizar completamente cómo el recubrimiento de aceite dieléctrico afecta a los parámetros de una línea de transmisión, se tiene que considerar las pérdidas de potencia del circuito. En este caso, la Tabla 4.3 muestra los resultados de las simulaciones de los escenarios donde el conductor tiene diferentes grosores de aceite dieléctrico, así como también los resultados del escenario de control donde solo se considera los conductores. Los resultados indican que las pérdidas por fase disminuyen levemente desde que se aplica la primera capa de aceite dieléctrico, reduciendo de 63538 W/km a 63527 W/km, por otra parte, las pérdidas en el neutro incrementaron sutilmente de 131.10 W/km a 131.31 W/km. Si bien es cierto existe un pequeño aumento en las pérdidas del neutro lo cual podría sugerir resultados negativos para las pruebas, sin embargo, esto es mucho menor a la disminución de pérdidas por fase. Considerando que las pérdidas de potencia se mantienen constantes sin importar el grosor de la capa de aceite dieléctrico, los resultados sugieren que lo mejor sería aplicar un recubrimiento dieléctrico fino al conductor.

Tabla 4.3 Pérdidas por Fase y en Neutro de la Línea de Transmisión

Grosor del recubrimiento dieléctrico [mm]	Pérdidas por fase W/km	Pérdidas en neutro W/km
0.0	63538	131.10
0.5	63527	131.31
1.0	63527	131.31
1.5	63527	131.31
2.0	63527	131.31
2.5	63527	131.31
3.0	63527	131.31
3.5	63527	131.31
4.0	63527	131.31
4.5	63527	131.31
5	63527	131.31
10	63527	131.31

4.3 Análisis del efecto aislador

Para el análisis del efecto aislador se tomará en consideración el número total de aisladores utilizados en el circuito, el cual se encuentra establecido en la Tabla 3.1 y la ecuación (2.12) mencionada en la sección 2.1.3.1. Cabe destacar que los valores de pérdidas de potencia por la conductancia del aislador ya se encuentran establecidos para ambientes húmedos y secos, debido a que las provincias por las que atraviesa la línea sobrepasan un nivel de humedad del 60% se toma el valor de 5 W por aislador [45]. Por consiguiente, las pérdidas de potencia trifásicas son las siguientes:

$$P_{TAislador} = 125250 [W]$$

Para poder compararlo con los resultados de efecto corona se lo dejará expresado como pérdidas de potencia monofásicas por unidad de longitud de la siguiente manera:

$$P_{TAislador} = 0.2209 \left[\frac{W}{m} \right]$$

4.4 Análisis del efecto corona

Como se mencionó en la sección 3.5.2 para analizar el efecto corona se analizaron 3 escenarios

4.4.1 Escenario de control

La primera simulación consistió en considerar una repartición uniforme del potencial eléctrico a lo largo de la sección transversal del conductor como se muestra en la Figura 4.3 y obtener los parámetros serie y paralelo de la línea.

Los resultados obtenidos de esta simulación son los mismos que se presentaron al inicio de este capítulo y se encuentran en la Tabla 4.1, además cabe destacar que en la Figura 4.3 se observa que la fase A se encuentra a aproximadamente 132.79 kV debido a que se muestra el potencial entre línea y neutro.

4.4.2 Escenario considerando efecto corona

Para el análisis de los parámetros del conductor considerando efecto corona se alteró la simulación de tal forma que la sección transversal del conductor no sea una superficie equipotencial, en su lugar la diferencia de potencial iría incrementando a medida que se acerca a las capas centrales. Esto se puede observar en la Figura 4.4, donde la capa externa del conductor experimenta 132.79 kV, la capa intermedia 135.45 kV y las capas internas 139.43 kV, además, es importante mencionar que se alteró el rango de colores que se tenía en el escenario anterior para que la variación de voltaje se pueda apreciar de mejor manera.

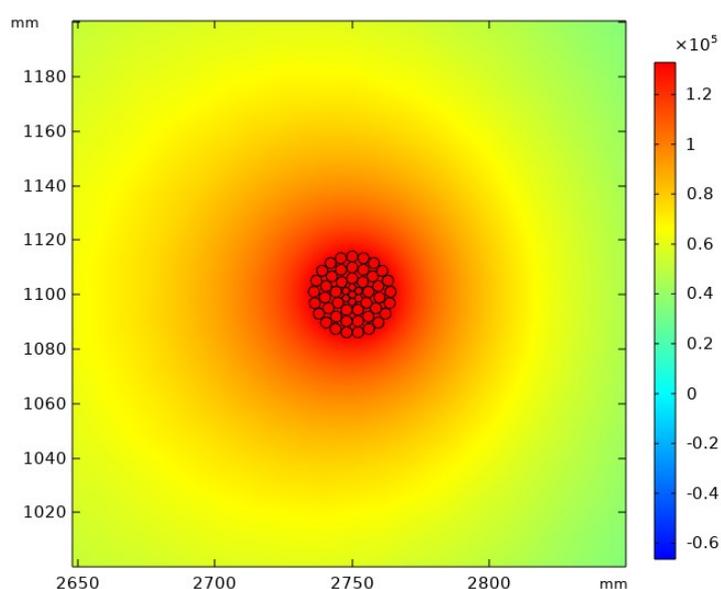


Figura 4.3 Potencia eléctrica de la fase A en el escenario de control

La Tabla 4.4 muestra los resultados de esta simulación en conjunto con la anterior, donde se puede apreciar que el parámetro que se ha visto afectado debido a la presencia del efecto corona es el parámetro paralelo. Esto se debe a que el Efecto corona produce un aumento en las pérdidas de potencia en el ambiente, lo que incrementa la conductancia de más del 200% para las fases A y C, y casi 185% para la fase B.

De igual manera se obtuvieron las pérdidas de potencia en el ambiente causadas por el efecto corona, siendo estas de 4.2465 [W/m] por fase, lo cual es casi 20 veces más a los 0.2209 [W/m] por fase que son las pérdidas de la línea debido al efecto aislador.

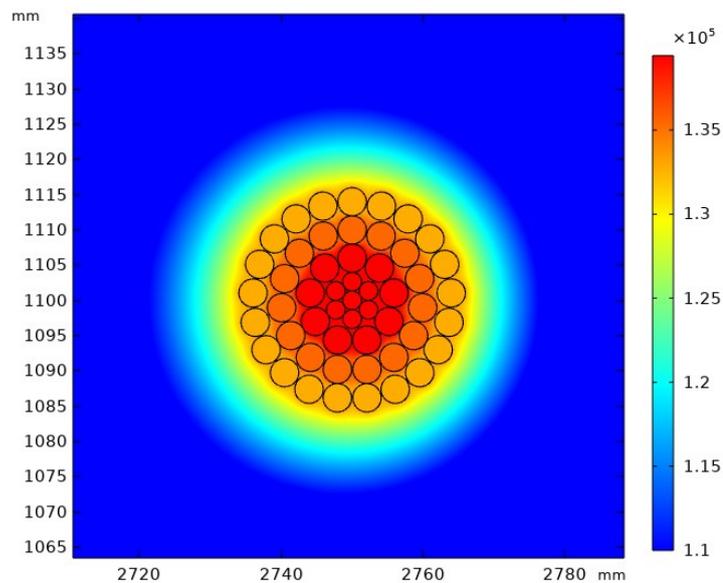


Figura 4.4 Potencia eléctrica de la fase A considerando efecto corona

Tabla 4.4: Comparativa Entre los Parámetros Eléctricos al Considerar Efecto Corona

Parámetro eléctrico	Control	Considerando efecto corona	Porcentaje de diferencia
P. paralelo de fase A [$\mu\text{F}/\text{km}$]	0.017114	0.036574	213.71%
P. paralelo de fase B [$\mu\text{F}/\text{km}$]	0.019825	0.036570	184.46%
P. paralelo de fase C [$\mu\text{F}/\text{km}$]	0.017115	0.037815	220.95%
Resistencia por fase [Ω/km]	0.051756	0.051756	0.00%
Inductancia por fase [mH/km]	0.673350	0.673350	0.00%

4.4.3 Escenario considerando efecto corona y recubrimiento dieléctrico

De los resultados obtenidos hasta este punto se ha podido determinar que ni el efecto corona ni el recubrimiento dieléctrico tienen un efecto sobre los parámetros serie de una línea de transmisión. Por esta razón para este escenario la Tabla 4.5 presenta únicamente los resultados del parámetro paralelo y las pérdidas por efecto corona. Los resultados muestran que el recubrimiento dieléctrico disminuyó significativamente el valor del elemento paralelo del sistema en comparación a al caso anterior donde solo se considera el efecto corona. A pesar de esto, si lo comparamos al caso de control donde el sistema opera en condiciones nominales el valor del parámetro paralelo aumentó aproximadamente 30%, mostrando una mejora significativa pero que no llega a mitigar por completo el impacto del efecto corona sobre la capacitancia.

Tabla 4.5 Parámetro Paralelo Considerando Efecto Corona y Aceite Dieléctrico

Grosor del recubrimiento dieléctrico [mm]	P. paralelo [$\mu\text{F}/\text{km}$]	Pérdidas por efecto corona por fase [W/m]
0.5	0.022275 0.022290 0.023001	3.3096
1.0	0.022287 0.022306 0.023064	3.3993
1.5	0.022310 0.022308 0.023069	3.5117
2.0	0.022310 0.022308 0.023069	3.5752
2.5	0.022310 0.022308 0.023069	3.6619
3.0	0.022310 0.022308 0.023069	3.7476
3.5	0.022310 0.022308 0.023069	3.8324
4.0	0.022310 0.022308 0.023069	3.9163
4.5	0.022310 0.022308 0.023069	3.9993
5	0.022310 0.022308 0.023069	4.0818

Además de esto también se aprecia una disminución de pérdidas por parte del efecto corona, donde a menor grosor del recubrimiento dieléctrico, menos pérdidas experimenta la línea. Estos resultados apoyan la idea de que idealmente se debería de utilizar un recubrimiento delgado de aceite dieléctrico, al considerar que el valor del parámetro paralelo se estabiliza a los 1.5 mm de grosor y que a este punto se tiene una reducción del 17.30% en pérdidas del conductor, es claro que esta es la elección idónea.

Una vez elegido el grosor de recubrimiento dieléctrico ideal, se procedió a hacer un análisis térmico simple donde se busca comprobar las propiedades refrigerantes del aceite dieléctrico. Para esto se analizan dos escenarios, la Figura 4.5 a) muestra el escenario base donde se sabe que al operar con una corriente rms de 640.36 A y sin considerar efecto corona la temperatura del conductor Bluejay 1113 kcmil no debería de sobrepasar los 50 °C, y el segundo escenario donde se le agrega la capa de 1.5 mm de aceite dieléctrico que se observa en la Figura 4.5 b). Utilizando una de las funciones de COMSOL Multiphysics se obtuvo que la temperatura máxima del conductor en el primer escenario es de 48.461 °C y para el segundo escenario es de 43.112 °C, demostrando de esta manera que el aceite dieléctrico logró disminuir la temperatura del conductor aproximadamente 5 °C.

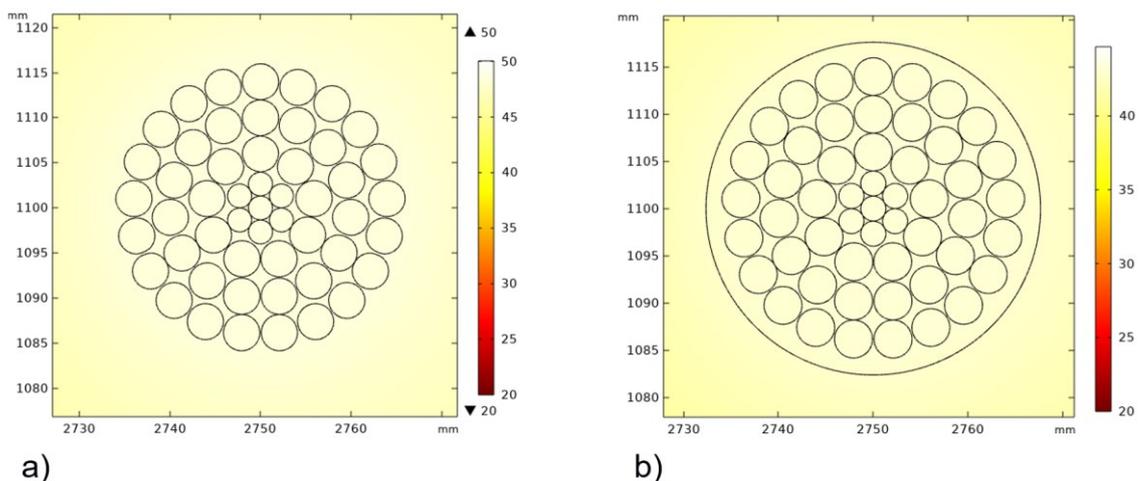


Figura 4.5 Temperatura del conductor a) control b) con aceite dieléctrico.

4.5 Análisis del efecto piel

Para analizar cómo el recubrimiento dieléctrico afecta al conductor en presencia del efecto piel se estudió la densidad de corriente a diferentes frecuencias utilizando COMSOL Multiphysics, los resultados se muestran en la Figura 4.6.

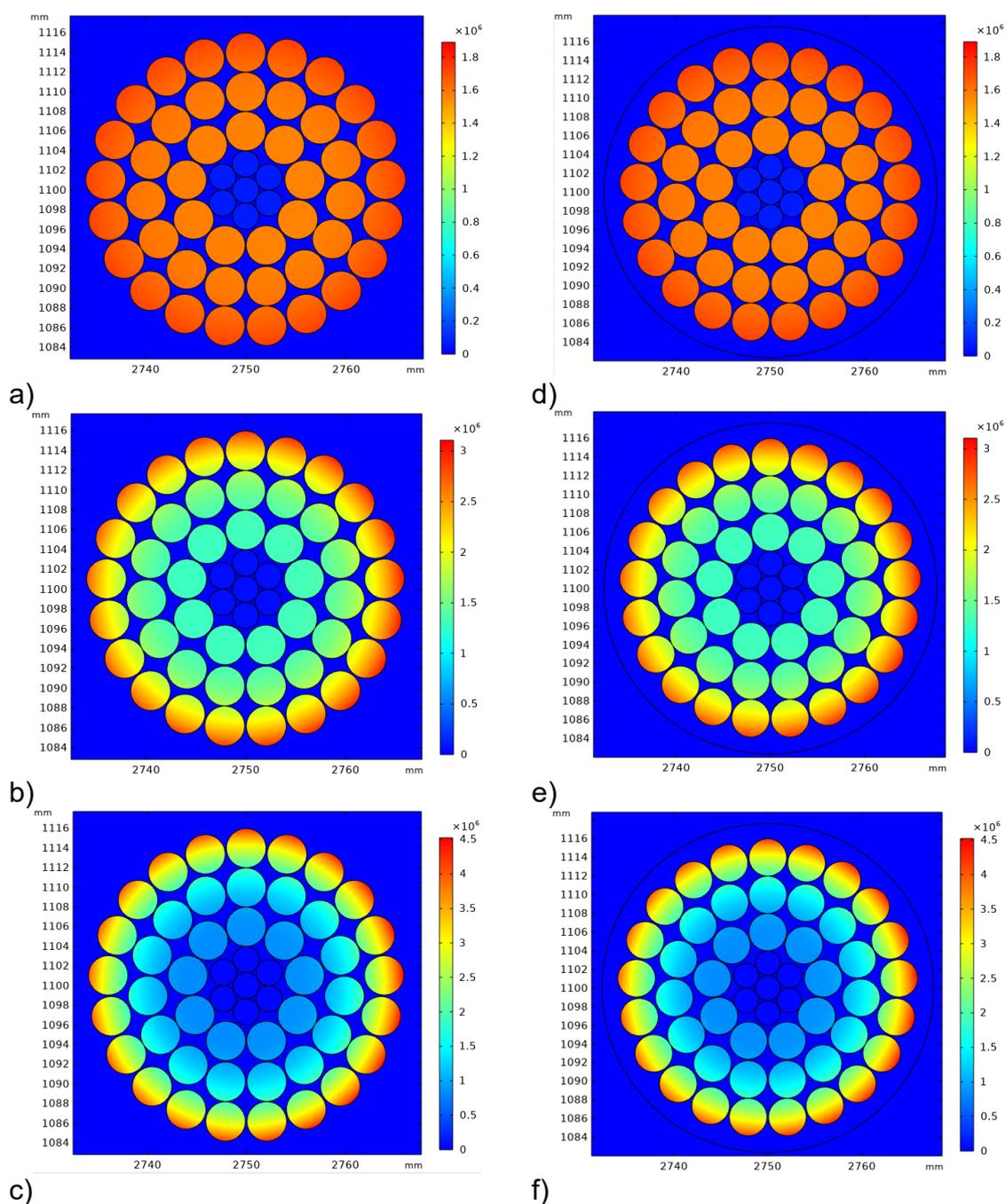


Figura 4.6 Densidad de corriente eléctrica para el escenario de control a una frecuencia de a) 60 Hz b) 240 Hz c) 500 Hz y el escenario con recubrimiento dieléctrico a una frecuencia de d) 60 Hz e) 240 Hz f) 500 Hz

Como se puede observar en la Figura 4.6, sin importar la frecuencia a la cual se analiza el modelo los resultados son iguales, indicando de esta manera que el recubrimiento dieléctrico no tiene un impacto significativo sobre el efecto piel. Al igual que en el caso de los parámetros serie, esto se debe a que el dieléctrico incrementa o disminuye el área por la cual la corriente circula, ni tampoco afecta la intensidad de esta.

4.6 Análisis de flujo de potencia de los modelos obtenidos

Como se mencionó en la Sección 3.6 se va a utilizar un modelo de línea larga para representar la línea de transmisión. De acuerdo con los resultados obtenidos hasta este punto, se decidió analizar los mismos escenarios que se plantearon en el análisis del efecto corona, es decir en condiciones normales de operación, en presencia de efecto corona y con efecto corona suprimido, los valores de los parámetros ABCD se pueden encontrar en la Tabla 4.6. Con estos datos y utilizando la ecuación (2.18) se calculó los parámetros de potencia necesarios para realizar el diagrama de círculo de cada escenario, considerando que se estudia en el punto más crítico que es cuando el voltaje cae a 0.95 p.u., a continuación se presenta los cálculos para el escenario de control:

$$S_B = \frac{|A| |V_R|^2}{|B|} = \frac{0.9532 \left(\frac{218.5 \times 10^3}{\sqrt{3}} \right)^2}{61.2038} = 247.8577 \text{ MVA}$$

$$\theta_B = \beta - \alpha = 180 + 78.6609 - 0.5690 = 258.0919^\circ$$

$$S_A = \frac{|V_S| |V_R|}{|B|} = \frac{\left(\frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{218.5 \times 10^3}{\sqrt{3}} \right)}{61.2038} = 273.7030 \text{ MVA}$$

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados de los cálculos realizados para hacer el diagrama de círculo de cada escenario.

Tabla 4.6 Parámetros ABCD de Línea Larga con Datos de COMSOL Multiphysics para el Escenario de Control, Considerando Efecto Corona y Efecto Corona Suprimido.

Parámetro	Control	Efecto corona	Efecto corona suprimido
A	0.9532∠0.5690°	0.9341∠8.9614°	0.9456∠2.4857°
B	61.2038∠78.6609°	60.6736∠81.3542°	61.0346∠79.2800°
C	0.0015∠90.1848°	0.0052∠40.9537°	0.0022∠65.3688°
D	0.9532∠0.5690°	0.9341∠8.9614°	0.9456∠2.4857°

Tomando en consideración los resultados obtenidos, se decidió utilizar una escala de 1 CM igual a 50 MVA para realizar el diagrama de círculo que se muestra en la Figura 4.7. Este representa las diferentes zonas de operación de la línea de transmisión, sin embargo, nuestro estudio se centra en el primer cuadrante debido a que este representa la capacidad de la línea para entregar tanto potencia activa como reactiva.

Tabla 4.7 Parámetros de Potencia Usados para Graficar el Diagrama de Círculo

	Control	Efecto corona	Efecto corona suprimido
S_B [MVA]	247.8577	245.0055	246.5511
θ_B [°]	258.0919	252.3928	256.7943
S_A [MVA]	273.7030	276.0950	274.4616

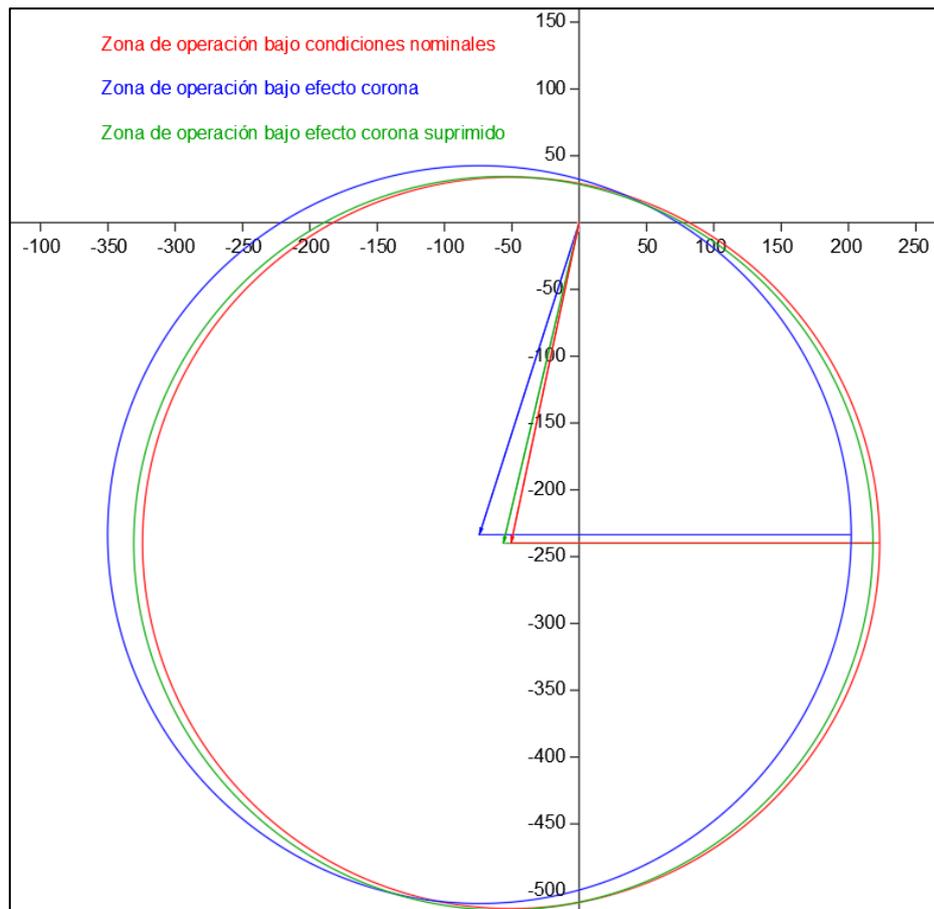


Figura 4.7 Capacidad de transferencia de la línea de transmisión

Al considerar un escenario donde la carga es puramente resistiva el punto de operación es el que se muestra en la Figura 4.8. En este escenario se observa que la potencia máxima monofásica que se puede transmitir por la línea bajo condiciones normales de operación es de 81.5 MW, mientras que cuando se manifiesta el efecto corona la capacidad máxima de transmisión de la línea es de 73.175 MW, reduciendo en 11.4% la capacidad total de la línea. Por otra parte, si analizamos el escenario donde el efecto corona ha sido suprimido con ayuda del recubrimiento dieléctrico, la potencia máxima que la línea es capaz de transferir es de 76.77 MW, logrando de esta manera que la capacidad de la línea solo se reduzca un 6.16% en comparación a cuando se encuentra en condiciones nominales.

4.7 Aplicación práctica en el ambiente laboral

Se conoce que los puntos críticos donde el conductor presenta elevadas temperaturas, y por ende se manifiesta el efecto corona, son los extremos del cable más cercanos a los aisladores. Debido a esto, se diseñó un mecanismo con la finalidad de poder aplicar un recubrimiento dieléctrico a los cables de alta tensión en dichos puntos críticos una vez el conductor haya excedido el límite de temperatura.

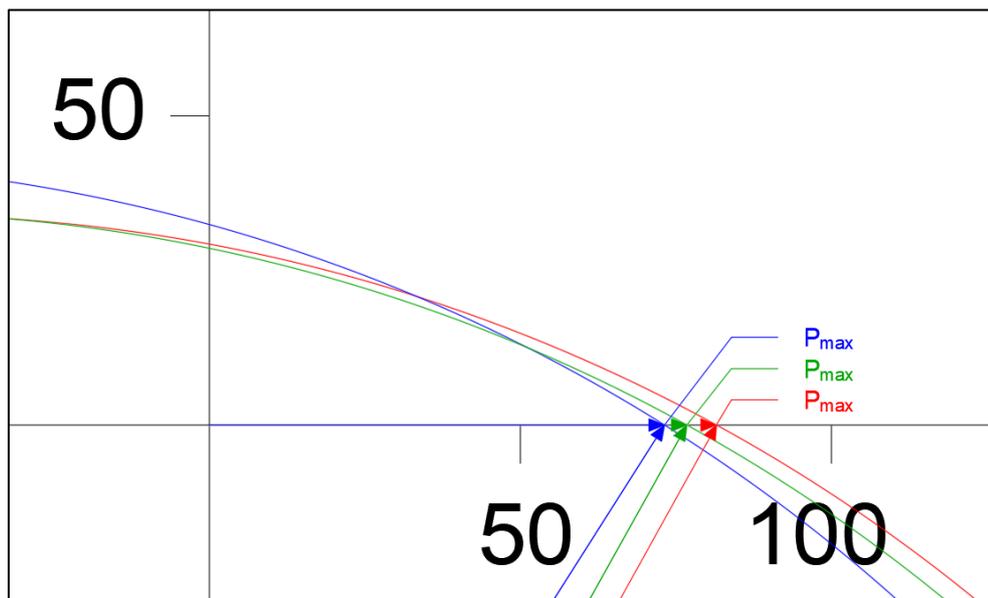


Figura 4.8 Punto de operación de la L/T ante una carga resistiva pura

La Figura 4.9 muestra una representación gráfica del mecanismo y las partes que lo componen. Su funcionamiento se basa en utilizar un polímero termoestable para contener el aceite dieléctrico hasta que el conductor haya alcanzado una temperatura superior a la temperatura de degradación del polímero. Una vez se haya llegado a este punto, el polímero se degradará y liberará el aceite dieléctrico, formando una capa que recubra al conductor.

Para la elección del polímero termoestable se ha tomado en cuenta que las empresas consideran que el límite de temperatura para la operación normal de conductores de líneas de transmisión es de 100 °C [46], y que el efecto corona es visible para el ser humano una vez el aire circundante alcanza una temperatura de 1426 °C. Por esta razón, se optó por utilizar un recubrimiento de 0.1 mm de grosor de resina de melanina la cual tiene una temperatura de degradación de 160 °C, recordando que el efecto corona está presente en las líneas de transmisión mucho antes de poder ser percibida por el ojo humano.

La zapata, abrazadera, tornillo, arandela y tuerca están hechos de acero galvanizado para asegurar su resistencia y durabilidad, capaces de aguantar las tensiones mecánicas ejercidas por el viento y el propio peso del conductor, así como las diferentes condiciones climáticas que se pueden presentar. La zapata cumple con dos funciones, la primera es contener tanto el aceite dieléctrico como el polímero en su lugar mediante el un recubrimiento cilíndrico y la segunda es permitir el acoplamiento con la cadena de aisladores con los dos terminales que sobresalen del centro.

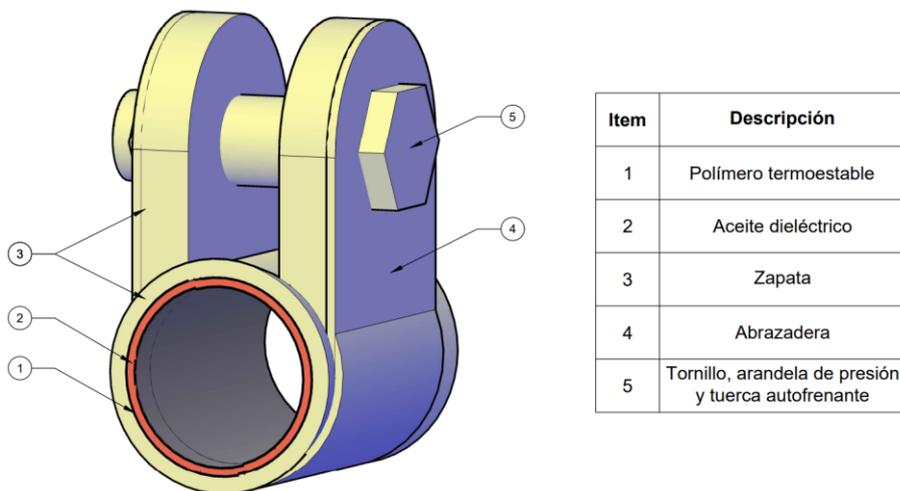


Figura 4.9 Mecanismo novedoso para almacenar y liberar el aceite dieléctrico

La abrazadera, tornillo, arandela y tuerca tienen el propósito de acoplar la zapata con la cadena de aisladores, de manera que se ajuste lo suficiente para evitar movimientos que desgasten las superficies de los materiales y afecten el rendimiento del mecanismo. En la Figura 4.10 se muestra el mecanismo acoplado a una línea de transmisión de 230 kV y una cadena de aisladores.

En las Figuras Figura 4.11 y Figura 4.12 se puede observar diferentes vistas del mecanismo donde se indican las dimensiones de este, cabe destacar que la zapata, abrazadera, tornillo, arandela y tuerca se basan en las utilizadas para una grapa de suspensión armada, la cual considera la normativa UNE-EN 61284. Por otra parte, el recubrimiento dieléctrico y las capas de resina de melanina tienen un grosor total de 1.7 mm, ya que de los resultados anteriores se determinó que un recubrimiento dieléctrico de 1.5 mm de espesor es ideal ya que ofrece los mejores resultados para disminuir pérdidas y mejorar los parámetros de las líneas.

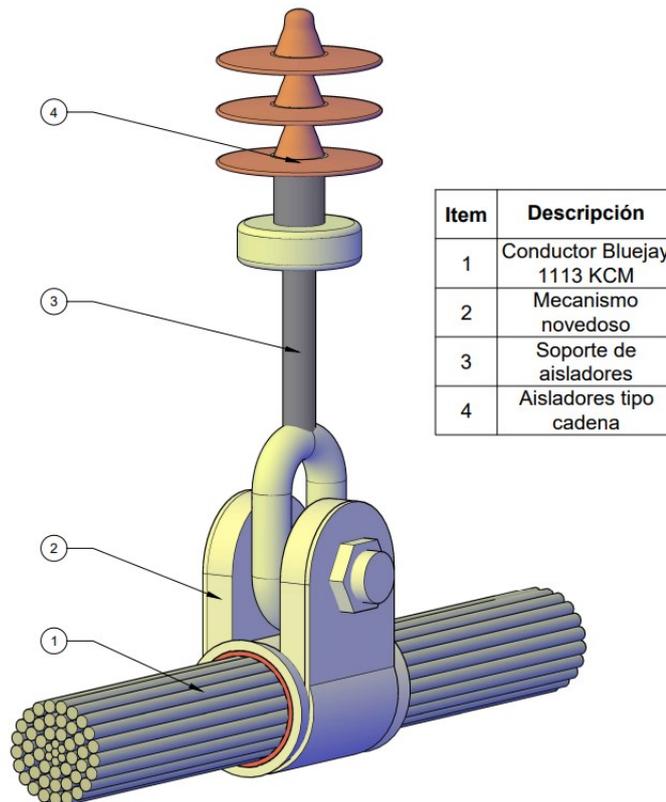


Figura 4.10 Mecanismo utilizado en una línea de transmisión de 230 kV

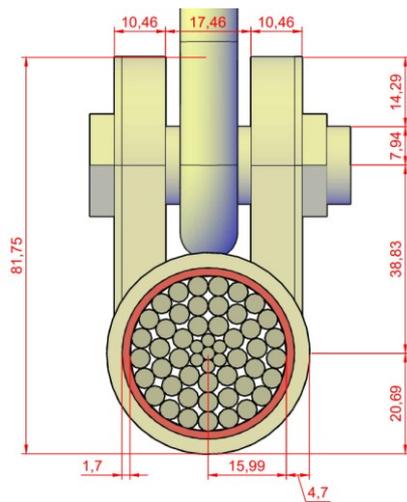


Figura 4.11 Vista frontal del mecanismo conectado a una L/T de 230 kV

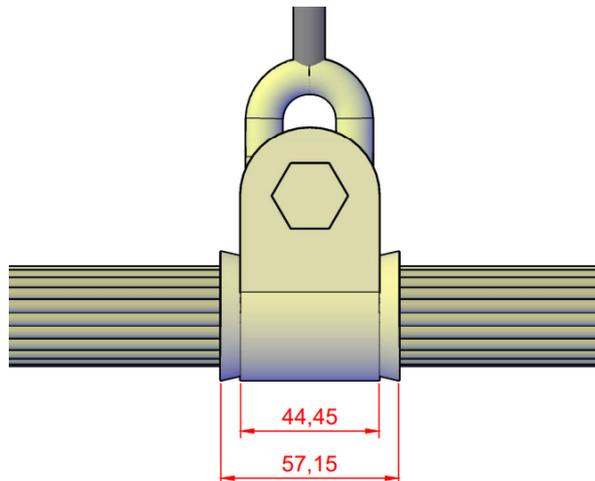


Figura 4.12 Vista lateral del mecanismo conectado a una L/T de 230 kV

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Un mallado fino permite una mejor precisión para las simulaciones debido a que se trabaja con valores con orden de magnitud de las mili y micro unidades al determinar los valores de resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia del conductor ACSR Bluejay 1113 kcmil modelado. Mismos valores que al ser comparados con los datos de la ficha técnica de su proveedor permitieron validar el diseño.
- De la evaluación realizada a la variación del grosor del recubrimiento de aceite dieléctrico se concluye que el aceite dieléctrico no afecta a los parámetros serie de resistencia e inductancia, mientras que tiene un ligero aumento en el parámetro paralelo de la línea ante condiciones nominales. De igual manera, al evaluar las pérdidas de potencia en fase y neutro se evidenció que las pérdidas en fase disminuyeron considerablemente en comparación al leve aumento en las pérdidas del neutro.
- El efecto corona ocasiona mayores pérdidas de potencia a la línea de la que se pierde por el efecto aislador. Esto fue determinado mediante la simulación de COMSOL Multiphysics la cual capta de manera precisa los fenómenos termodinámicos y electromagnéticos, permitiendo simular el efecto corona y piel, resultados que se compararon con las pérdidas ocasionadas por el efecto aislador obtenidas de forma teórica.
- Del diagrama de círculo se pudo determinar que al considerar el efecto corona la capacidad de transferencia de la línea se ve reducida en un 11.4% respecto a su capacidad nominal. Sin embargo, al aplicar el recubrimiento dieléctrico se logra disminuir estas pérdidas al reducir el valor del parámetro paralelo a un valor cercano al que tenía bajo condiciones nominales. Esto se refleja como una mejora

en la capacidad de transferencia de la línea, reduciendo tan solo 6.16% respecto a su capacidad nominal.

- El mecanismo novedoso permite aplicar un recubrimiento dieléctrico a los cables de alta tensión en los puntos críticos donde la temperatura es mayor y experimentan pérdidas por efecto corona de forma segura. Lo cual además de ayudar a mejorar la calidad y servicio de energía eléctrica en el país, también creará oportunidades laborales para aquellos encargados de producir y reemplazar dicho recubrimiento una vez el aceite sea aplicado

5.2 Recomendaciones

- Al diseñar el modelo geométrico de los conductores y la línea de transmisión en general, se recomienda utilizar la opción “LiveLink™” disponible entre AutoCAD y COMSOL Multiphysics. Esto permitirá optimizar el tiempo del usuario a lo largo de la etapa de diseño o en caso de requerir alguna modificación ya que los cambios realizados en alguno de los programas se verán automáticamente reflejados en el otro.
- Se recomienda realizar un estudio térmico más detallado sobre el modelo propuesto utilizando un modelo en 3D de la línea de transmisión con y sin el recubrimiento dieléctrico. De esta manera se podrá analizar las variaciones térmicas que experimenta el conductor cuando los efectos Joule, corona y piel se manifiestan de forma conjunta.
- Para evaluar y validar el diseño propuesto de manera más precisa, se recomienda replicar el mismo procedimiento para líneas de extra alta y ultra alta tensión con sus respectivos conductores de fase y neutro. Luego de obtener los valores de los parámetros serie y paralelo de las líneas de transmisión utilizando el programa, realizar los cálculos teóricos de estos mismos parámetros considerando el recubrimiento dieléctrico y compararlos con los resultados experimentales obtenidos.

- En este estudio se utilizó el diagrama de círculo para analizar las variaciones en la capacidad de transmisión de potencia de la línea considerando condición de operación nominal, efecto corona y efecto corona suprimido. Sin embargo, para analizar de mejor manera el flujo de potencia y las pérdidas que se produce en cada escenario, es recomendable plantear un sistema de potencia completo con las etapas de generación, transmisión y distribución, donde se utilicen métodos iterativos para su resolución.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Grupo Banco Mundial, “Consumo de energía eléctrica (kWh per cápita) - Ecuador |Data,” 2021.
<https://datos.bancomundial.org/indicador/eg.use.elec.kh.pc?end=2014&locations=EC&start=2000> (accessed Nov. 17, 2021).
- [2] CNEL-EP, “Plan Nacional de Eficiencia Energética,” 2015.
- [3] MINISTERIO DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES, “Balance Energético Nacional,” 2018.
- [4] MINISTERIO DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES, “Plan Maestro de Electricidad,” 2017.
- [5] Tecnológico de Monterrey, “Ahorro de energía,” 2017.
- [6] T. Gonen, *Electric Power Transmission System Engineering Analysis and Design*, 2nd ed. New York: CRC Press, 2009. [Online]. Available: www.LearnEngineering.in
- [7] N. Ghasem, Chandima Gomes, and Mohd Zainal, “Corona Losses: Issues and Solutions,” *IEEE*, 2013.
- [8] A. I. Brito, V. M. Machado, M. E. Almeida, and M. Guerreiro Das Neves, “Skin and proximity effects in the series-impedance of three-phase underground cables,” *Electric Power Systems Research*, vol. 130, pp. 132–138, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2015.08.027.
- [9] E. Pierri, O. Binder, N. G. A. Hemdan, and M. Kurrat, “Challenges and opportunities for a European HVDC grid,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70. Elsevier Ltd, pp. 427–456, Apr. 01, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.233.
- [10] W. Rubén, A. Zambrano, L. Antonio, and E. Quishpe, “Estudio de las Ventajas y Desventajas de Usar HVDC Sobre Sistemas de Generación Eólica,” Quito, 2013.
- [11] I. Rodríguez, “TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR CORRIENTE CONTINUA (Direct Current Energy Transmission),” 2016.
- [12] S. R. Mahmoudi, K. Adamiak, and G. S. P. Castle, “On the corona discharge spreading of dielectric liquid films,” *Journal of Electrostatics*, vol. 71, no. 3, pp. 496–498, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.elstat.2012.12.038.
- [13] P. Patrocinante, C. Vergara, and J. Quezada, “Metodología de Construcción de Líneas de Transmisión Eléctrica,” *Universidad Austral de Chile*, 2005.

- [14] H. Saadat, *Electric Power Systems: System Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [15] S. Lumbreras and A. Ramos, "The new challenges to transmission expansion planning. Survey of recent practice and literature review," *Electric Power Systems Research*, vol. 134. Elsevier Ltd, pp. 19–29, May 01, 2016. doi: 10.1016/j.epsr.2015.10.013.
- [16] T. Bravo and E. Terán, "Instructivo para selección de ruta para líneas de transmisión," 2017.
- [17] IEEE, *1863-2019 - IEEE Guide for Overhead AC Transmission Line Design*. IEEE, 2019.
- [18] National Electrical Manufacturers Association, "American National Standard Electric Power Systems and Equipment-Voltage Ratings (60 Hertz) permitted without license from IHS," 2011.
- [19] A. Rossi, C. Jubayer, H. Koss, D. Arriaga, and H. Hangan, "Combined effects of wind and atmospheric icing on overhead transmission lines," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 204, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jweia.2020.104271.
- [20] A. K. Kazerooni and J. Mutale, "Transmission network planning under security and environmental constraints," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 1169–1178, May 2010, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2036800.
- [21] D. Han, G. H. Kim, J. Kim, and B. Ahn, "Effect of Al/Cu weight fraction on the mechanical and electrical properties of Al-Cu conductors for overhead transmission lines," *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 65, no. 3, pp. 1019–1022, 2020, doi: 10.24425/amm.2020.133210.
- [22] The Aluminum Association, *Aluminum Electrical Conductor Handbook*, Third. 1989.
- [23] J. Glover, S. Mulukutla, and J. Thomas, *Power System Analysis and Design*, Fifth. 2012.
- [24] R. Meyberg, M. T. Correia de Barros, F. M. Absi Salas, L. A. M. C. Domingues, and A. C. S. Lima, "Improved Electromagnetic Model for Steel-Cored Conductors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3056062.
- [25] J. Grainger and W. Stevenson, *POWER SYSTEM ANALYSIS*. McGraw-Hill, 1994.

- [26] W. C. C. Jurado, M. Castro, W. Saltos, and J. Hernández, "Transposition of medium and long transmission lines," *International Journal of Physical Sciences and Engineering*, 2019, doi: 10.29332/ijpse.v3n1.236.
- [27] R. M. Mujal, *Cálculo de líneas y redes eléctricas*, First. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 2013.
- [28] J. Glover, S. Mulukutla, and J. Thomas, *Power System Analysis and Design*, Fifth. 2012.
- [29] F. Ahmad, A. A. Khan, Q. Khan, and M. R. Hussain, "State-of-Art in Nano-Based Dielectric Oil: A Review," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 13396–13410, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2893567.
- [30] D. Njombog Tante et al., "Properties of Transformer Oil that Affect Efficiency," 2014.
- [31] J. Piñeros, "Fluidos Esteres: Una solución innovadora para Transformadores de Potencia," Apr. 2015.
- [32] Z. H. Shah and Q. A. Tahir, "Dielectric Properties of Vegetable Oils," *J. Sci. Res*, vol. 3, no. 3, pp. 481–492, 2011, [Online]. Available: www.banglajol.info/index.php/JSR
- [33] C. Perrier, "Natural Ester Oils: A Promising Solution," 2010.
- [34] Repsol, "Aceite dieléctrico para transformadores y equipos eléctricos | Repsol," 2021. <https://www.repsol.com/es/productos-y-servicios/lubricantes/industria/gama-dielectricos/index.cshtml> (accessed Nov. 17, 2021).
- [35] Repsol, "BIO ELECTRA INDUSTRIA Lubricantes," 2021.
- [36] COMSOL, "COMSOL Multiphysics Reference Manual." 1998. [Online]. Available: www.comsol.com/blogs
- [37] J. T. Celigüeta Lizarza, *Método de los elementos finitos para análisis estructural*. Tecnun, 2011.
- [38] E. F. Valero, "Aportaciones al Estudio de las Máquinas Eléctricas de Flujo Axial Mediante la Aplicación del Método de los Elementos Finitos," 2004.
- [39] INECEL, "Sistema de Transmisión Paute," 1985.
- [40] General Cable, "Cable de Aluminio con Cableado Concéntrico y Núcleo de Acero Galvanizado ACSR."
- [41] Conducol, "CABLE DE ACERO GALVANIZADO 3/8"

- [42] COMSOL, "Modeling Cables in COMSOL®: An Electromagnetics Tutorial Series." <https://www.comsol.com/model/cable-tutorial-series-43431> (accessed Jan. 04, 2022).
- [43] J. Grainger and W. Stevenson, *POWER SYSTEM ANALYSIS*. McGraw-Hill, 1994.
- [44] A. Nancy, H. Rosas, and F. M. Padilla, "Diseño de Torres de Transmisión Eléctrica," México DF, 2005.
- [45] L. Checa, "LÍNEAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA," Zaragoza, 1998.
- [46] C.-B. Rafael, "Determination of Transmission Limits on Electric Power Systems," vol. XV, no. 2, pp. 271–286, 2014.