

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



TEMA:

IMPACTO DE LAS RADIACIONES UV-B EN LA LONGEVIDAD DEL AISLAMIENTO ELÉCTRICO EN LOS SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.

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

AUTOR:

Geovanny Alexander Malte Noguera

DIRECTOR (A):

PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano

Ibarra-Ecuador, 2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004817290
APELLIDOS Y NOMBRES:	Malte Noguera Geovanny Alexander
DIRECCIÓN:	Ibarra
EMAIL:	gamalten@utn.edu.ec
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL: 0985800907

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Impacto de las radiaciones UV-B en la longevidad del aislamiento eléctrico en los sistemas de energía solar fotovoltaica.
AUTOR (ES):	Malte Noguera Geovanny Alexander
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	03/09/2025
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano MSc. Julio Esteban Guerra Masson

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 3 días del mes de septiembre de 2025

EL AUTOR:
 (Firma).....

Nombre: Geovanny Alexander Malte Noguera



**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Yo, Gerardo Isaías Collaguazo Galeano en calidad de director del señor estudiante Malte Noguera Geovanny Alexander certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: Impacto de las radiaciones UV-B en la longevidad del aislamiento eléctrico en los sistemas de energía solar fotovoltaica.

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

Firma

PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



DEDICATORIAS

A mis padres, por ser mi guía, por su amor incondicional, su apoyo constante y sacrificio silencioso, han sido pilares fundamentales en cada uno de mis pasos. Su paciencia y sus palabras de aliento han sido el motor que me impulso a seguir adelante y la clave para alcanzar todos y cada uno de mis logros. A ustedes, que siempre buscaron lo mejor para nosotros, les dedico este trabajo con profunda gratitud y cariño.

A mis familiares que ya no se encuentran presentes, pero que fueron parte esencial de mi crecimiento. Su apoyo, enseñanzas y guía a lo largo de mi vida dejaron huella profunda en mí. Les dedico este trabajo, porque su influencia sigue presente en cada paso que doy.

Y a todos aquellos que, de una u otra manera, me impulsaron a seguir adelante. Este trabajo es también fruto de su apoyo.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a dios por darme la fortaleza y sabiduría para superar todos y cada uno de los desafíos personales y académicos. A mis padres, José Malte y Elvia Noguera, quienes son el motivo de mi inspiración y dedicación constante, gracias a sus sacrificio y consejos he logrado cumplir con mis metas.

Agradezco a mis hermanos y familiares por su apoyo a lo largo de este proceso, gracias por estar presente, por brindarme consejos y ayuda en los momentos difíciles. Su apoyo fue fundamental para lograr todos mis logros en mi vida.

A mis compañeros Diego Almeida, Damián Pupiales y Shyríc Terán, por los grandes momentos compartidos, las risas y por el apoyo mutuo en los desafíos académicos. Gracias por haber sido parte de esta etapa inolvidables y por contribuir, con su amistad y compañerismo, a hacer de este recorrido una experiencia enriquecedora.

Agradezco también a mi director PhD. Gerardo Collaguazo y mi asesor MSc. Julio Guerra, por su guía constante, paciencia y valiosos aportes en mi investigación. Extiendo igualmente mis agradecimientos a los ingenieros docentes, por las enseñanzas transmitidas y por su contribución significativa en mi formación académica y profesional.



INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIAS.....	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	14
CAPITULO I.....	15
1.1 Problema de investigación.....	15
1.1.1 Problema.....	15
1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación.....	16
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo general.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 Alcance y delimitación.....	17
1.4 Justificación.....	17
1.5 Antecedentes.....	19
CAPÍTULO II.....	23
2.1 Energía Solar.....	23
2.1.1 Componentes de un Sistema Fotovoltaico.....	24
2.2 Aislamientos Eléctricos en Sistemas Fotovoltaicos.....	28
2.2.1 Materiales Utilizados para Aislamientos.....	28



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



2.2.2	Normativas y Estándares de Aislamientos	29
2.2.3	Técnicas de Prueba y Evaluación de Aislamientos	30
2.3	Caracterización de Cables en Sistemas Fotovoltaicos.....	30
2.3.1	Requisitos de los Cables en Instalaciones Fotovoltaicas.....	31
2.3.2	Tipos de Cables Fotovoltaicos.....	31
2.4	Efectos de la Radiación UV-B.....	39
2.4.1	Efecto en la degradación de los materiales poliméricos.....	40
2.4.2	Factores que Afectan la Degradación.....	40
2.4.3	Métodos para Evaluar la Degradación del Aislamiento	41
CAPÍTULO III		43
3.1	Tipo de investigación.....	43
3.2	Metodología para el modelado y simulación de las muestras	44
3.2.1	Método.....	44
3.2.2	Enfoque.....	45
3.2.3	Evaluación	46
3.2.4	Flujograma.....	46
3.3	Software.....	48
3.4	Módulos empleados en la simulación.....	48
3.4.1	Módulo de Transferencia de Calor en Sólidos	49



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



3.4.2	Módulo de Corrientes eléctricas	49
3.4.3	Módulo de Óptica de rayos.....	50
3.5	Ecuaciones matemáticas de los módulos dentro del software	50
3.5.1	Formulas empleadas por el módulo Transferencia de Calor en Sólidos	50
3.5.2	Formulas empleadas por el módulo de Corrientes eléctricas	52
3.5.3	Formulas empleadas por el módulo Óptica de rayos.....	54
3.6	Procedimiento para el modelado y construcción de los cables FV	55
3.6.1	Geometría del cable	55
3.6.2	Asignación de materiales y propiedades	58
3.6.3	Implementación de módulos.....	60
3.6.4	Mallado.....	63
3.6.5	Estudio y configuración temporal.....	64
CAPITULO IV		66
4.1	Resultados de la simulación.	66
4.1.1	Comportamiento a la Trayectoria de rayos.....	67
4.1.2	Comportamiento térmico	71
4.1.3	Comportamiento eléctrico	78
4.2	Análisis de los resultados	88
4.2.1	Análisis a la trayectoria de rayos	88



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



4.2.2	Análisis térmico.....	89
4.2.3	Análisis eléctrico	90
4.2.4	Análisis completo	92
CONCLUSIONES.....		94
RECOMENDACIONES		94
BIBLIOGRAFIA		95
ANEXOS		98



INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Estructura básica de un sistema fotovoltaico [19]	24
Fig. 2 Estructura del cable pv1-f [31].....	32
Fig. 3 Estructura del cable PV-Wire [33].....	34
Fig. 4 Estructura del cable H1Z2Z2-K [34]	36
Fig. 5 Estructura del cable USE-2 [36]	38
Fig. 6 Modelado 2D del conductor para el cable PV1-F.....	56
Fig. 7 Modelado 2D del conductor con aislamiento del cable PV1-F	57
Fig. 8 Modelado del cable PV1-F	57
Fig. 9 Geometría final del cable en el dominio del aire	58
Fig. 10 Mallado del modelo del cable en el dominio del aire	64
Fig. 11 Captura de la interfaz del estudio temporal	65
Fig. 12 Proyección de los rayos UV-B en el cable PV1-F (intensidad de 2.5 W/m ²) e interacción con el material aislante	68
Fig. 13 Proyección de los rayos UV-B en el cable PV-Wire (intensidad de 2.5 W/m ²) e interacción con el material aislante	69
Fig. 14 Proyección de los rayos UV-B en el cable H1Z2Z2-K (intensidad de 2.5 W/m ²) e interacción con el material aislante	70
Fig. 15 Proyección de los rayos UV-B en el cable USE-2 (intensidad de 2.5 W/m ²) e interacción con el material aislante	71
Fig. 16 Evolución térmica en la superficie del aislamiento del cable PV1-F a lo largo del tiempo: a) 1 mes 22.9 °C, b) 3 meses 24.9 °C, c) 6 meses 27.8°C, d) 1 año 33.7 °C, e) 5 años 81.1 °C, f) 10 años 140 °C.....	73



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



Fig. 17 Evolución térmica en la superficie del aislamiento del cable PV-Wire a lo largo del tiempo: a) 1 mes 22.9 °C, b) 3 meses 25.1 °C, c) 6 meses 28.3°C, d) 1 año 34.7 °C, e) 5 años 86.1 °C, f) 10 años 150 °C..... 74

Fig. 18 Evolución térmica en la superficie del aislamiento del cable H1Z2Z2-K a lo largo del tiempo: a) 1 mes 22.9 °C, b) 3 meses 25.1 °C, c) 6 meses 28.3°C, d) 1 año 34.7 °C, e) 5 años 86.1 °C, f) 10 años 150 °C..... 76

Fig. 19 Evolución térmica en la superficie del aislamiento del cable USE-2 a lo largo del tiempo: a) 1 mes 23 °C, b) 3 meses 25.4 °C, c) 6 meses 28.9°C, d) 1 año 36 °C, e) 5 años 92.5 °C, f) 10 años 163 °C 77

Fig. 20 Grafica de Potencial eléctrico (V), Norma del campo de desplazamiento eléctrico (C/m²), Densidad de la pérdida volumétrica, electromagnética (W/m³), a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 1 año, e) 5 años, f) 10 años 80

Fig. 21 Grafica de Potencial eléctrico (V), Norma del campo de desplazamiento eléctrico (C/m²), Densidad de la pérdida volumétrica, electromagnética (W/m³), a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 1 año, e) 5 años, f) 10 años 83

Fig. 22 Grafica de Potencial eléctrico (V), Norma del campo de desplazamiento eléctrico (C/m²), Densidad de la pérdida volumétrica, electromagnética (W/m³), a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 1 año, e) 5 años, f) 10 años 85

Fig. 23 Grafica de Potencial eléctrico (V), Norma del campo de desplazamiento eléctrico (C/m²), Densidad de la pérdida volumétrica, electromagnética (W/m³), a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 1 año, e) 5 años, f) 10 años 88



INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Especificaciones técnicas del cable PV1-F	32
Tabla 2 Parámetros constructivos y eléctricos cable PV1-F	33
Tabla 3 Especificaciones técnicas del cable PV-WIRE	34
Tabla 4 Parámetros constructivos y eléctricos cable PV-WIRE	35
Tabla 5 Especificaciones técnicas del cable H1Z2Z2-K	36
Tabla 6 Parámetros constructivos y eléctricos cable H1Z2Z2-K	37
Tabla 7 Especificaciones técnicas del cable USE-2	38
Tabla 8 Parámetros constructivos y eléctricos cable USE-2	39
Tabla 9 Efectos a causa de la radiación en los materiales poliméricos	40
Tabla 10 Propiedades básicas del conductor de cobre estañado.....	58
Tabla 11 Propiedades básicas de la poliolefina reticulada XLPO	59
Tabla 12 Propiedades básicas del polietileno reticulado XLPE	59
Tabla 13 Propiedades básicas del aire dadas por el software	60
Tabla 14 Comparativa del comportamiento de cada cable en las distintas pruebas	93



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



RESUMEN

Esta investigación analizó el impacto de la radiación UV-B en la longevidad del aislamiento eléctrico en cables utilizados en sistemas de energía solar fotovoltaica. Estos se encuentran expuestos de forma constante a condiciones ambientales extremas, siendo la radiación UV-B un factor en la degradación de sus propiedades dieléctricas y mecánicas. Se seleccionaron los cables PV1-F, PV-Wire, H1Z2Z2-K y USE-2, a los cuales mediante simulación computacional se evolucionó el deterioro de las propiedades mecánicas y eléctricas de los materiales aislantes bajo exposición a radiación UV-B en periodos de 1, 3 y 6 meses, y proyecciones a 1, 5 y 10 años. Para ellos se emplearon los módulos de Óptica de rayos, Transferencia de calor en sólidos y Corrientes Eléctricas, con el fin de modelar la interacción de la radiación con estos materiales en condiciones controladas.

Los resultados permitieron evaluar el comportamiento térmico y eléctrico del aislamiento, evidenciando el deterioro progresivo de sus propiedades. Este deterioro conlleva una mayor acumulación térmica y un aumento de las pérdidas dieléctricas, lo que pueden comprometer la seguridad y eficiencia del sistema. La exposición a la radiación UV-B induce a procesos de fotooxidación y acumulación térmica, lo que genera una degradación progresiva de los materiales, manifestada como pérdida de flexibilidad, agrietamiento y disminución de la rigidez dieléctrica.

Palabras clave: Radiación UV-B, aislamiento eléctrico, cables fotovoltaicos, propiedades dieléctricas, fotooxidación, degradación de materiales, pérdidas dieléctricas.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



ABSTRACT

This research analyzed the impact of UV-B radiation on the longevity of electrical insulation in cables used in photovoltaic solar energy systems. These cables are constantly exposed to extreme environmental conditions, with UV-B radiation being a key factor in the degradation of their dielectric and mechanical properties. The study focused on PV1-F, PV-Wire, H1Z2Z2-K, and USE-2 cables, evaluating the deterioration of the insulating materials' mechanical and electrical properties through computational simulation under UV-B exposure for periods of 1, 3, and 6 months, as well as projections of 1, 5, and 10 years. The simulation employed the Ray Optics, Heat Transfer in Solids, and Electric Currents modules to model the interaction between radiation and these materials under controlled conditions.

The results allowed for the evaluation of the thermal and electrical behavior of the insulation, revealing a progressive deterioration of its properties. This degradation leads to increased thermal accumulation and dielectric losses, which may compromise the safety and efficiency of the system. UV-B radiation exposure induces photooxidation and thermal accumulation processes, causing progressive material degradation manifested as loss of flexibility, cracking, and decreased dielectric strength.

Keywords: UV-B radiation, electrical insulation, photovoltaic cables, dielectric properties, photooxidation, material degradation, dielectric losses.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Tema:

Impacto de las radiaciones UV-B en la longevidad del aislamiento eléctrico en los sistemas de energía solar fotovoltaica.

1.1 Problema de investigación.

1.1.1 Problema.

Los sistemas de energía solar fotovoltaica están expuestos a diversos factores ambientales que pueden afectar su efectividad. Entre estos factores se incluyen el polvo, la humedad, la lluvia y la radiación UV, los cuales presentan desafíos en términos de durabilidad y confiabilidad de los diferentes componentes del sistema. Esto ha llevado a la necesidad de analizar el impacto de estos factores en la eficacia y longevidad de dichos sistemas.

Entre los factores ambientales, las radiaciones UV-B son una amenaza significativa, ya que desempeñan un rol crucial en el deterioro del material aislante. Este deterioro puede desencadenar un proceso de degradación en el aislamiento del conductor que conecta los distintos paneles solares con el regulador de carga, siendo este el componente más expuesto a variaciones de temperatura y radiaciones UV-B, lo que compromete su integridad estructural y funcionamiento con el tiempo.

A pesar de la importancia del aislamiento eléctrico en los sistemas fotovoltaicos, aún se comprende poco el impacto específico de las radiaciones UV-B en la longevidad



de estos materiales. La degradación del aislamiento eléctrico puede causar fallas prematuras en el sistema, pérdida de eficiencia y riesgos de seguridad. Por lo tanto, es fundamental investigar y entender cómo las radiaciones UV-B afectan la vida útil del aislamiento eléctrico en los sistemas de energía solar fotovoltaica.

1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación

¿Cuál es el impacto de la radiación UV-B en las propiedades mecánicas y eléctricas del material aislante utilizado en los sistemas de energía solar fotovoltaica?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el impacto de las radiaciones UV-B en la longevidad del aislamiento eléctrico en los sistemas de energía solar fotovoltaica, mediante la evaluación del deterioro en sus propiedades mecánicas y eléctricas utilizando el software COMSOL Multiphysics.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los tipos de cables empleados en la transmisión de energía desde el panel solar hasta inversor o el regulador de carga.
- Realizar simulaciones en COMSOL Multiphysics para evaluar el deterioro del aislamiento eléctrico en los cables seleccionados debido a la exposición a radiación UV-B.
- Evaluar el impacto de la degradación en las propiedades mecánicas y eléctricas del material aislante a partir de los resultados de la simulación.



1.3 Alcance y delimitación

Esta investigación se centrará en el estudio de los tipos de conductores utilizados en los sistemas de energía fotovoltaica, con especial énfasis en los cables que conectan los paneles solares con el inversor o el regulador de carga. Debido a su exposición constante a la radiación UV-B, el aislamiento eléctrico de estos cables puede sufrir degradación en sus propiedades mecánicas y eléctricas a lo largo de tiempo.

Para el estudio, se seleccionó los cables fotovoltaicos más ampliamente utilizados en la industria como lo son los cables: PV1-F, PV-Wire, H1Z2Z2-K y USE-2, considerando las especificaciones mecánicas y eléctricas del fabricante.

El análisis del impacto de las radiaciones UV-B se realizará mediante simulación computacional utilizando COMSOL Multiphysics. En estas simulaciones, se modelará el comportamiento del aislamiento eléctrico bajo exposición a radiaciones UV-B, evaluando su deterioro estructural en distintos periodos de tiempo: 1, 3 y 6 meses, así como proyecciones a largo plazo de 1, 5 y 10 años.

En COMSOL Multiphysics se analizará la interacción de la radiación con el material en el dominio del tiempo, permitiendo una evaluación detallada de los cambios en sus propiedades mecánicas y eléctricas en condiciones controladas y con variaciones específicas en los parámetros de exposición a UV-B.

1.4 Justificación

El estudio de este problema es importante, puesto que el aislamiento eléctrico es crucial en los sistemas fotovoltaicos para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



Los materiales aislantes utilizados en los componentes de estos sistemas, como el recubrimiento de los cables solares, están constantemente expuestos a la radiación UV-B. Esta exposición puede provocar la degradación del material, así como la disminución de sus propiedades mecánicas y eléctricas, lo que eventualmente puede ocasionar irregularidades en el sistema.

Aunque se han realizado investigaciones sobre el impacto de las radiaciones UV-B en el aislamiento eléctrico en otros contextos, como la industria eléctrica y de telecomunicaciones, falta estudios específicos que aborden este tema en el contexto de los sistemas de energía solar fotovoltaica.

Se espera observar la degradación del aislamiento eléctrico debido a la radiación UV-B y establecer una comparativa entre las características iniciales y finales, tiempo de exposición y el grado de degradación. Estos resultados proporcionarán una comprensión más profunda del impacto de las radiaciones UV-B en los sistemas de energía solar fotovoltaica y servirán como base para el desarrollo de estrategias de mitigación.

Además, esta investigación tiene implicaciones ambientales significativas al promover la sostenibilidad, reduciendo la generación de residuos electrónicos y la huella ambiental asociada con la fabricación y mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos. Desde una perspectiva económica, la reducción de los costos de mantenimiento asociados con la degradación de los aislantes contribuye a hacer la energía solar fotovoltaica más competitiva en el mercado energético.



Asimismo, este estudio contribuirá al conocimiento científico sobre la durabilidad y confiabilidad de los sistemas de energía solar fotovoltaica en entornos con alta exposición a la radiación UV-B. Los hallazgos de esta investigación pueden ser utilizados por diseñadores, fabricantes y operadores de sistemas fotovoltaicos para mejorar la calidad y la vida útil de los componentes aislantes, lo que a su vez contribuirá a una mayor adopción de la energía solar como fuente de energía sostenible.

1.5 Antecedentes

Desde la segunda guerra mundial, la energía solar ha experimentado una evolución constante durante varios años. En los años setenta y ochenta, la mayoría de los países del mundo comenzaron a trabajar en la tecnología solar, tanto a gran escala como para aplicaciones domésticas, con el objetivo de compensar el gran gasto generado por el petróleo [1]. En la actualidad se están adoptando con éxito a nivel mundial alternativas energéticas sostenibles para mejorar la calidad del servicio eléctrico, ahorrar recursos naturales, reducir las pérdidas y contribuir a la disminución de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. [2]

La aceleración del progreso tecnológico y la modernización industrial en los últimos años ha contribuido a la rápida expansión de las plantas de energía solar y lidera una transformación significativa de la energía global. La energía solar sigue ganando popularidad como una de las fuentes renovables más populares para satisfacer la demanda de energía mundial en rápido crecimiento debido a sus ventajas de ser limpia, segura e inagotable. [3]



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



Este sistema todavía tiene fallas, y la mayoría de las fallas en el sistema fotovoltaico son causadas por "fallos en el aislamiento de los cables", "daños por impacto", "daños por masticación de roedores" y cortocircuitos o arcos accidentales en el sistema [4]. La principal debilidad de la energía solar fotovoltaica es su naturaleza intermitente y su riesgo de pérdidas y fallas. Una caracterización de pérdidas y fallas ayuda a consolidar una evaluación de desempeño confiable y orienta hacia la eficiencia esperada del sistema. [5]

Los paneles solares deben soportar diversos factores ambientales, y los cables utilizados en los sistemas fotovoltaicos, que deben resistir sobretensiones, condiciones climáticas y otros factores ambientales específicos de la ubicación en la que se instalan, son los componentes más afectados [6]. Hoy en día, un tema de gran relevancia es el impacto de la radiación ultravioleta en la degradación de materiales utilizados y que están expuestos continuamente a la radiación solar. Es bien conocido que el contenido de rayos ultravioleta de la luz solar tiene un impacto negativo en las propiedades mecánicas de los materiales, lo que puede reducir su vida útil en algunos casos. [7]

La disposición de los componentes en el sitio de instalación, la topología del inversor, los cables, los módulos fotovoltaicos y el número de inversores, el ángulo de inclinación de los módulos fotovoltaicos y el efecto de sombreado son todos temas que se estudian continuamente con el fin de optimizar las plantas de energía fotovoltaica. [8]

El estándar de temperatura para generar una potencia de salida óptima es alrededor de 25°C. Cuando el sistema fotovoltaico se aplica en un clima cálido, la temperatura de la celda de silicio puede superar fácilmente la temperatura ambiente. A medida que una



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



célula solar de silicio se sobrecalienta, genera más corriente y menos voltaje, se produce una caída de voltaje y la potencia generada disminuye [9]. Para defectos y modos de falla que no se pueden detectar mediante inspección visual, se utilizan técnicas espectroscópicas y microscópicas avanzadas para su detección. [10]

Las compañías que fabricantes de este tipo de elementos ofrecen algunos consejos para que el sistema fotovoltaico funcione en las mejores condiciones y tenga un buen rendimiento y una buena durabilidad. Estos consejos incluyen orientación e instalación, mantenimiento, limpieza y protección contra altas temperaturas. [11]

Las pérdidas de energía debidas a estos componentes afectan negativamente al rendimiento del sistema, según los resultados observados en estudios, se ha demostrado que las pérdidas del cable también afectan el rendimiento del sistema en 1,7%, 0,6% y 0,2% para áreas de sección transversal de 1,5 mm² , 4 mm² y 10 mm² respectivamente. En estudios experimentales, se ha demostrado que el uso de cables solares con diferentes áreas de sección transversal y diferentes longitudes no afecta significativamente el rendimiento del sistema fotovoltaico en los sistemas fotovoltaicos pequeños. [12]

Como los cables de DC generalmente se instalan al aire libre, están diseñados con aislamiento de doble capa y tienen una resistencia superior a la corrosión. Estos conectan módulos fotovoltaicos, inversores y otros componentes eléctricos del sistema. Una disposición óptima de los cables de DC puede reducir en gran medida los daños al sistema fotovoltaico. [13]



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



El tipo y calibre adecuados de los conductores mejoran el rendimiento y la confiabilidad del sistema FV. Los conductores deben dimensionarse para que las caídas de tensión en todos los circuitos sean inferiores al 3%. En general, cumplir con los requisitos establecidos en el reglamento electrotécnico de baja tensión es suficiente [14]. Es fundamental seguir avanzando en la tecnología de captación, acumulación y distribución de energía solar para lograr condiciones que la hagan completamente competitiva. [15]

La optimización de los sistemas fotovoltaicos requiere una aproximación integral que contemple tanto los aspectos técnicos específicos, como el correcto dimensionamiento de conductores y el cumplimiento normativo, como la perspectiva de desarrollo tecnológico a largo plazo. Solo mediante la inversión continua en investigación e innovación, la energía solar podrá consolidarse como una alternativa energética plenamente viable y competitiva frente a las fuentes convencionales, contribuyendo significativamente a la transición hacia un modelo energético sostenible.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2 Introducción

Este capítulo abordará brevemente el fundamento teórico relacionado a la energía solar y los sistemas de energía solar fotovoltaica, esto como introducción al tema para posteriormente centrarse específicamente en los cables fotovoltaicos más usados y su respectivo aislamiento eléctrico, así como al impacto de las radiaciones UV-B en el material aislante.

2.1 Energía Solar

La energía del sol se ha utilizado desde el inicio de los tiempos y ha sido fundamental para la naturaleza y los humanos. Incluso en tiempo nublado, se puede obtener energía directamente del sol [5]. La utilización de energía solar para generar electricidad, calentar y/o desalinizar agua está ganando popularidad en todo el mundo. Las celdas solares son dispositivos electrónicos que utilizan el efecto fotoeléctrico para convertir directamente la luz solar en electricidad. [16]

El efecto fotovoltaico es el proceso de producir electricidad directamente de la luz. En 1839, el físico Antoine Becquerel demostró la existencia de este fenómeno. Para lograrlo, se necesita un material que absorba la luz del sol y pueda convertir la energía radiante absorbida en energía eléctrica, algo que las células fotovoltaicas pueden hacer. [17]



2.1.1 Componentes de un Sistema Fotovoltaico

La estructura básica de un sistema fotovoltaico se observa en la Fig. 1, la cual cuenta con las células fotovoltaicas absorben la luz solar y la transforman en energía eléctrica. Un controlador de carga apoyado en el panel de control controla este sistema y protege la batería de sobrecargas, lo que prolonga su vida útil. El inversor funciona con 12 voltios de corriente continua (DC) y 127 voltios de corriente alterna (AC) [18]. Tiene fotocélulas que funcionan como diodos y tiene una función de control de carga para evitar descargas y sobrecargas en baterías y sistemas de almacenamiento que están conectados o compuestos por soportes de almacenamiento. [19]

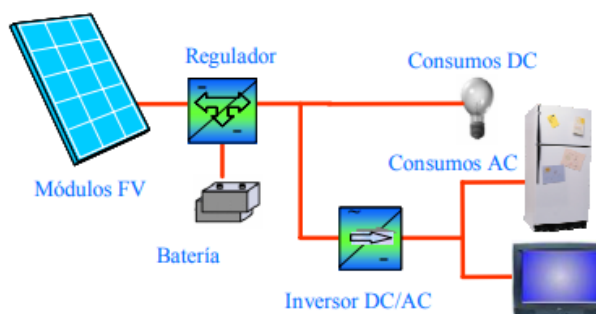


Fig. 1 Estructura básica de un sistema fotovoltaico [19]

El funcionamiento de los distintos equipos que compone un sistema fotovoltaico se expone a continuación:

2.1.1.1 Celda fotovoltaica

El generador, también conocido como celda fotovoltaica, es el componente principal de cualquier sistema fotovoltaico. Esta transforma directamente los fotones de la luz en energía eléctrica.



La terminal N de una celda fotovoltaica está expuesta a la radiación solar y la terminal P está en la zona de sombra. Cada una de estas partes del diodo contiene las terminales de conexión de la célula. En la zona P, la cara está completamente cubierta para evitar recibir rayos solares, mientras que en la zona N, el metalizado tiene forma de peine para permitir que la radiación solar ingrese al semiconductor. [20]

2.1.1.2 Inversor

El inversor controla la corriente de acuerdo con las características de la corriente generada por las aplicaciones de la instalación [21]. Al convertir la corriente continua de la batería en corriente alterna, posee las siguientes características: voltaje, sobrecarga de capacidad, potencia, voltaje de salida, trabajo de frecuencia

2.1.1.3 Regulador de carga

La función del regulador de carga es administrar de manera óptima la energía de las baterías, evitando una sobrecarga o descarga excesiva de la batería [22]. Controla el voltaje de las baterías y así alarga su vida útil, además, de asegurar un óptimo suministro de energía.

2.1.1.4 Sistema de almacenamiento o Baterías

El sistema de almacenamiento cumple la función principal de almacenar electricidad, consiste en un conjunto de baterías de plomo ácido que pueden convertir la energía química en energía eléctrica durante horas de radiación con poca o ninguna luz solar [21]. La forma en que funciona depende del valor de la corriente máxima que puede proporcionar a una carga constante continua, su capacidad para almacenar energía, la profundidad de descarga y su vida útil.



2.1.1.5 Soporte o estructura

Los paneles o módulos fotovoltaicos se montan en el armazón conocido como estructura soporte. Su función principal es orientar y fijar los paneles en la posición ideal para captar la mayor cantidad de radiación solar posible [19]. Las estructuras fijas y de seguimiento del movimiento solar son los dos tipos principales. Las estructuras fijas se instalan con una inclinación y orientación fijas, mientras que los seguidores solares ajustan la posición de los paneles a lo largo del día y las estaciones para rastrear el recorrido del sol, maximizando así la captación de energía. Las estructuras de soporte deben ser resistentes a la corrosión, el viento y la nieve. [23]

2.1.1.6 Sistema de Puesta a Tierra:

Unión equipotencial compuesta por una varilla de cobre enterrada en el suelo conectada a un circuito formado por un cable de tierra conectado a la estructura, paneles, tablero y componentes metálicas. [23]

2.1.1.7 Cables de conexión

En un sistema fotovoltaico, el cableado es el conjunto de conductores eléctricos que transportan la energía generada por los paneles solares hacia el inversor, las baterías (en caso de sistemas autónomos) y la red eléctrica [20]. Para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del sistema y reducir las pérdidas de energía durante la transmisión, es necesario un cableado adecuado y de alta calidad. Varios tipos de cables están disponibles para instalaciones fotovoltaicas y están diseñados para resistir condiciones ambientales difíciles y tener una larga vida útil. [19]



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



El cableado en un sistema fotovoltaico es crucial para su eficiencia y seguridad. Un diseño adecuado del cableado puede minimizar las pérdidas de energía, reducir el riesgo de incendios y garantizar una larga vida útil del sistema. En este tipo de sistemas se aplican los siguientes cables:

- Cables solares: Diseñados específicamente para sistemas fotovoltaicos, son resistentes a los rayos UV, al ozono y a temperaturas extremas.
- Cables de corriente continua (DC): Utilizados entre los paneles y el inversor.
- Cables de corriente alterna (AC): Usados desde el inversor hasta el punto de conexión a la red o los dispositivos de consumo. [22]

Además, el dimensionamiento del cableado es muy importante ya que el tamaño adecuado de los cables es esencial para minimizar las pérdidas de energía. Factores para considerar:

- Longitud del cable
- Corriente máxima esperada
- Caída de tensión admisible (generalmente se recomienda no superar el 1-2%)
- Temperatura ambiente y método de instalación. [19]

Para que los sistemas fotovoltaicos funcionen mejor y dure más tiempo, es necesario mantener el cableado. Este proceso implica inspecciones regulares de cables y conexiones para encontrar signos de desgaste o daños que puedan obstaculizar el funcionamiento eficiente del sistema. Para evitar cortocircuitos o fugas de corriente, es fundamental verificar la integridad del aislamiento de los cables [18]. La utilización de



cámaras termográficas es crucial para localizar puntos calientes que pueden ser indicativos de conexiones defectuosas o sobrecargas en el cableado. La detección temprana de estos problemas ayuda a evitar fallos más graves y costosas. El mantenimiento regular garantiza que el sistema fotovoltaico funcione de manera segura y eficiente a largo plazo y prolonga su vida útil. [20]

La eficiencia de un sistema fotovoltaico se ve significativamente afectada por un cableado bien diseñado. Un diseño ideal mejora la eficiencia del sistema al reducir las pérdidas de energía durante la transmisión. Más energía producida por los paneles solares llega a su destino al reducir la resistencia eléctrica y el flujo de corriente [23]. Esto mejora el rendimiento inmediato y prolonga la vida útil del sistema, aliviar el estrés de los componentes y reducir el riesgo de fallas. Como resultado, invertir en un cableado de alta calidad proporciona ventajas evidentes para la producción de energía y la durabilidad del sistema fotovoltaico. [22]

2.2 Aislamientos Eléctricos en Sistemas Fotovoltaicos

Los aislamientos eléctricos protegen los conductores y equipos eléctricos de cortocircuitos, descargas eléctricas y otros peligros, lo que los hace cruciales en los sistemas fotovoltaicos. Los aislamientos en estas instalaciones están expuestos a altas temperaturas, radiación ultravioleta, humedad y contaminantes, lo que puede dañar su integridad y rendimiento. [24]

2.2.1 Materiales Utilizados para Aislamientos

Es esencial utilizar materiales aislantes apropiados que satisfagan los requisitos de resistencia térmica, eléctrica y ambiental. El rango de temperaturas de operación, la



resistencia a la intemperie (rayos UV, ozono y humedad), las propiedades dieléctricas, la facilidad de instalación y el costo son algunos de los factores que afectan la elección del material aislante. [25]

Los polímeros termoplásticos y termoestables son los materiales de aislamiento eléctrico más comunes utilizados en sistemas fotovoltaicos.

2.2.1.1 Polímeros termoplásticos:

Son los materiales formados por polímeros que a partir de una determinada temperatura pierden su resistencia mecánica y se deforman. En este grupo están: Poliolefina (Z1), Policloruro de vinilo (PVC), Polietileno (PE) y Poli cloropreno (PCP). [25]

2.2.1.2 Polímeros termoestables:

Son materiales poliméricos de estructura reticulada que no se deforman con el aumento de la temperatura, para los valores de servicio en los que trabaja de baja y alta tensión. Entre ellos se encuentra el Polietileno reticulado (XLPE) y Etileno Propileno (EPR). [25]

2.2.2 Normativas y Estándares de Aislamientos

La calidad, la seguridad y la confiabilidad de los aislamientos de los sistemas fotovoltaicos están reguladas por normas y estándares. Los organismos internacionales y locales como IEC y UL crean estas normas. [26]

Los requisitos y especificaciones técnicas para los aislamientos eléctricos en sistemas fotovoltaicos están establecidos por normativas y estándares internacionales. La



IEC 62930 para cables fotovoltaicos, la IEC 60216 para propiedades eléctricas de materiales aislantes y la UL 4703 para cables de uso en sistemas fotovoltaicos son algunas de las normas más relevantes. [27]

2.2.3 Técnicas de Prueba y Evaluación de Aislamientos

Para garantizar el desempeño y la durabilidad de los aislamientos, se requieren técnicas de prueba y evaluación para garantizar que los aislamientos funcionen correctamente a lo largo de su vida útil.

Los ensayos eléctricos, térmicos, mecánicos y ambientales entre ellos simulan las condiciones de operación reales y permiten la detección de defectos, la medición de propiedades y la evaluación del envejecimiento de los materiales aislantes. [27]

Estas técnicas pueden aumentar la especificidad mediante pruebas de compatibilidad con otros materiales, resistencia a la radiación UV, propiedades mecánicas y eléctricas y envejecimiento acelerado. Algunas técnicas comunes incluyen ensayos de tensión soportada, resistencia de aislamiento, rigidez dieléctrica y factor de potencia. [27, 28]

2.3 Caracterización de Cables en Sistemas Fotovoltaicos

Los cables son esenciales para los sistemas fotovoltaicos porque transportan la energía eléctrica producida por los módulos solares de manera segura y eficiente a los inversores, las cargas y la red eléctrica [29]. Sin embargo, para garantizar el mejor rendimiento y una larga vida útil en las condiciones ambientales difíciles a las que están



expuestos en las instalaciones solares, estos cables deben cumplir con ciertos requisitos específicos.

2.3.1 Requisitos de los Cables en Instalaciones Fotovoltaicas

Estos incluyen una excelente resistencia al ozono, las altas temperaturas, la intemperie, la humedad y la radiación ultravioleta. Además, deben tener propiedades ignífugas, alta resistencia a la tracción y al impacto, y una baja emisión de humos tóxicos en caso de incendio. Para reducir las pérdidas de energía, se requiere una alta conductividad eléctrica y una baja caída de tensión. [30]

2.3.2 Tipos de Cables Fotovoltaicos

Existe una variedad de tipos de cables fotovoltaicos diseñados para cumplir con estos requisitos. El cable PV1-F, el cable PV-Wire, el cable H1Z2Z2-K y el cable USE-2 son algunos de los más comunes. Cada uno de estos cables tiene una estructura y composición única, así como características mecánicas, eléctricas y de resistencia a factores ambientales particulares, lo que los hace ideales para aplicaciones específicas en sistemas fotovoltaicos.

2.3.2.1 Cable PV1-F

El cable PV1-F es un cable fotovoltaico ampliamente utilizado en instalaciones solares para conexiones entre los módulos solares y el inversor. La estructura de este tipo de cable se muestra en la Fig. 2 donde se puede ver de mejor manera su composición. [31]



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



Fig. 2 Estructura del cable pv1-f [31]

A continuación, la Tabla 1 se presenta las especificaciones técnicas detalladas que definen las características normativas, constructivas, mecánicas, eléctricas y de resistencia ambiental de este cable [32], proporcionando la información necesaria para su correcta selección e implementación en proyectos fotovoltaicos.

Tabla 1 Especificaciones técnicas del cable PV1-F

CATEGORÍAS TÉCNICAS	DESCRIPCIÓN DETALLADA
Normativa	Cumple con la norma IEC 60332-1 y EN 50618, fue el estándar principal en la industria europea hasta la introducción del H1Z2Z2-K
Estructura y composición	Este cable conductor está fabricado con cobre estañado o aluminio clase 5 (flexible), cuenta con aislamiento y cubierta de poliolefina reticulada (XLPO) resistente a la intemperie y radiación UV, y maneja tensiones nominales de 1500 V DC o 600-1000 V AC.
Propiedades mecánicas y eléctricas	Este conductor presenta excelentes propiedades mecánicas con alta resistencia a la tracción, impacto y abrasión, además de buena flexibilidad clase 5 ideal para doblado en instalaciones, una resistencia de 3.39 Ω/km.



Resistencia a factores ambientales	Este cable soporta temperaturas desde -40°C hasta +125°C en condiciones normales (y hasta +140°C en sobrecarga), posee alta resistencia UV para exposición solar prolongada y ofrece una durabilidad de 25 años.
---	--

○ **Dimensiones**

Adicionalmente, se indica en la Tabla 2 las dimensiones del conductor que se será la recomendada para conexiones residenciales pequeñas o comerciales con distancias medias. [32]

Tabla 2 Parámetros constructivos y eléctricos cable PV1-F

Parámetros físicos y eléctricos	Valores nominales
Corriente	70A
Sección	6 mm ²
Diámetro del conductor	3.15 mm
Espesor aislamiento	0.7 mm
Espesor de cubierta exterior	0.8 mm
Diámetro exterior total del cable	6.15 mm

2.3.2.2 Cable PV-Wire

El PV-Wire es un cable fotovoltaico común en instalaciones solares en América del Norte y otros países que siguen normas de seguridad UL. La estructura de este tipo de cable se muestra en la Fig. 3 donde se puede ver cómo es su composición interna. [33]



Fig. 3 Estructura del cable PV-Wire [33]

Estos cables especializados deben cumplir con rigurosos estándares de calidad y seguridad, mientras ofrecen un rendimiento óptimo durante décadas de operación continua. En la Tabla 3 se detallan las características técnicas principales que definen el rendimiento y la confiabilidad de este cable fotovoltaico: [33]

Tabla 3 Especificaciones técnicas del cable PV-WIRE

CATEGORÍAS TÉCNICAS	DESCRIPCIÓN DETALLADA
Normativa	Cumple con las normas UL 4703 y NEC (National Electrical Code) en los Estados Unidos.
Estructura y composición	Está fabricado con cobre estañado o sin estañar resistente a la corrosión, cuenta con aislamiento y cubierta de poliolefina reticulada (XLPO) que proporciona alta resistencia al calor y la intemperie, y maneja tensiones nominales de 600 V CA/CC o 1000 V CA/CC.
Propiedades mecánicas y eléctricas	Este conductor presenta excelentes resistencias mecánicas con buena resistencia a la abrasión y condiciones severas, flexibilidad clase 5 para instalaciones exigentes, resistencia de 3.64 Ω/km a 20°C para un cable de sección 6 mm ² .
Resistencia a factores ambientales	Soporta temperaturas desde -40°C hasta +125°C en condiciones normales (y hasta +140°C en sobrecarga), posee alta resistencia UV para



exposición solar prolongada y cuenta con una durabilidad de 25 años.

○ **Dimensiones**

Las dimensiones del conductor que se indican en la tabla 4 será la recomendada para conexiones residenciales pequeñas o comerciales con distancias medias. [33]

Tabla 4 Parámetros constructivos y eléctricos cable PV-WIRE

Características	Dimensiones
Corriente	60 A
Sección	5.26 mm ² (10AWG)
Diámetro del conductor	3.1 mm
Espesor aislamiento	1.1 mm
Espesor de cubierta exterior	0.76 mm
Diámetro exterior total del cable	6.82 mm

2.3.2.3 Cable H1Z2Z2-K

Cable solar estándar europeo actualizado (H1Z2Z2-K) con el cable solar europeo destinado a la interconexión dentro de sistemas fotovoltaicos como matrices de paneles solares. Adecuado para instalaciones fijas, internas y externas, dentro de conductos o sistemas.

La estructura de este tipo de cable se muestra en la Fig. 4 donde se puede ver cómo es su composición interna. [34]



Fig. 4 Estructura del cable H1Z2Z2-K [34]

El cable H1Z2Z2-K es una innovación que supera las limitaciones de los cables fotovoltaicos tradicionales, destacando por su mayor resistencia térmica, durabilidad y seguridad. La Tabla 5 detalla sus especificaciones técnicas, que lo posicionan como la solución premium para sistemas fotovoltaicos modernos. [35]

Tabla 5 Especificaciones técnicas del cable H1Z2Z2-K

CATEGORÍAS TÉCNICAS	DESCRIPCIÓN DETALLADA
Normativa	Cumple con la norma IEC 62930 y EN 50618, que garantiza mejores propiedades mecánicas y térmicas en comparación con el PV1-F.
Estructura y composición	Está fabricado con cobre estañado o aluminio clase 5 (flexible), cuenta con aislamiento y cubierta de poliolefina reticulada (XLPO) que proporciona mayor resistencia a la temperatura e intemperie, y maneja tensiones nominales de 1500 V DC o 600-1000 V AC.
Propiedades mecánicas y eléctricas	Este conductor presenta excelentes propiedades mecánicas con alta resistencia a la tracción, impacto y abrasión, buena flexibilidad clase 5 adecuada para flexión y doblado en instalaciones, y resistencia de 3.39 Ω/km para un cable de sección 6 mm ² .



Resistencia a factores ambientales

Este cable soporta temperaturas desde -40°C hasta $+90^{\circ}\text{C}$ en condiciones normales (y hasta $+250^{\circ}\text{C}$ en cortocircuito), posee alta resistencia UV para exposición solar prolongada y ofrece una durabilidad de 30 años.

○ **Dimensiones**

Las dimensiones del conductor detalladas se muestran en la Tabla 6, seleccionadas en instalaciones fotovoltaicas residenciales de baja potencia y comerciales de mediana escala. Esta recomendación técnica considera factores clave como: [35]

Tabla 6 Parámetros constructivos y eléctricos cable H1Z2Z2-K

Características	Dimensiones
Corriente	70 A
Sección	6 mm^2
Diámetro del conductor	3.3 mm
Espesor aislamiento	0.7 mm
Espesor de cubierta exterior	0.8 mm
Diámetro exterior total del cable	6.3 mm

2.3.2.4 Cable USE-2

El cable USE-2 es un cable para servicio en exteriores común en instalaciones solares en América del Norte, aunque su uso principal es para conexiones de corriente continua entre paneles e inversores. La estructura de este tipo de cable se muestra en la Fig. 5 donde se puede ver cómo es su composición interna. [36]



Fig. 5 Estructura del cable USE-2 [36]

Este conductor ofrece excelente resistencia estructural y comportamiento confiable en condiciones ambientales severas. Las siguientes especificaciones técnicas de la Tabla 7 detallan las características del cable USE-2 para sistemas de energía solar. [37]

Tabla 7 Especificaciones técnicas del cable USE-2

CATEGORÍAS TÉCNICAS	DESCRIPCIÓN DETALLADA
Normativa	Cumple con las normas Cumple con las normas UL 854 y UL 4703
Estructura y composición	Este cable conductor está fabricado con cobre o cobre estañado, sólido o trenzado, cuenta con aislamiento de copolímero de poliolefina reticulado (XLPO) resistente a la humedad y abrasión con vaina o recubrimiento XLPE, y maneja una tensión nominal de 600 V CC.
Propiedades mecánicas y eléctricas	Presenta excelentes propiedades mecánicas con alta resistencia a la tracción, impacto y abrasión, menor flexibilidad que los cables PV1-F o PV-Wire al estar diseñado para aplicaciones donde la flexibilidad no es crítica, y resistencia de 3.59 Ω/km.
Resistencia a factores ambientales	Soporta temperaturas desde -40°C hasta +90°C en condiciones normales (y hasta +250°C en



cortocircuito), posee alta resistencia UV para exposición solar prolongada y cuenta con una durabilidad de 25 años.

○ Dimensiones

La siguiente Tabla 8 presenta las especificaciones constructivas y eléctricas del cable USE-2, detallando sus dimensiones físicas y capacidad de corriente. [37]

Tabla 8 Parámetros constructivos y eléctricos cable USE-2

Características	Dimensiones
Corriente	50 A.
Sección	5.3 mm ² (10 AWG)
Diámetro del conductor	3 mm
Espesor aislamiento	0.8 mm
Espesor de cubierta exterior	1 mm
Diámetro exterior total del cable	6.6 mm

2.4 Efectos de la Radiación UV-B

La radiación ultravioleta (UV) es un tipo de radiación electromagnética con longitudes de onda más cortas que la luz visible. Específicamente, la radiación UV-B, con longitudes de onda entre 280 y 315 nanómetros, es una componente particularmente dañina de la radiación solar que alcanza la superficie terrestre. [38]

Los materiales poliméricos utilizados como aislamiento eléctrico en los cables y otros componentes enfrentan un gran desafío en el contexto de los sistemas fotovoltaicos cuando están expuestos a la radiación UV-B. Aunque estos materiales están diseñados



para proteger a los conductores y brindar un funcionamiento seguro y eficiente, la radiación UV-B puede dañarlos. [39]

2.4.1 Efecto en la degradación de los materiales poliméricos

La exposición a la radiación UV-B puede provocar diversos efectos perjudiciales, en la Tabla 9 muestra los efectos que podrían ocasionar. [40]

Tabla 9 Efectos a causa de la radiación en los materiales poliméricos

EFECTO	DESCRIPCION
Foto degradación	Ruptura de enlaces químicos, escisión de cadenas y formación de radicales libres. Disminuye propiedades mecánicas.
Decoloración y amarilleamiento	Cambios en el color debido a la formación de productos de degradación cromóforos.
Agrietamiento	Formación de grietas y micro fisuras en la superficie, aumentando la fragilidad.
Disminución de propiedades eléctricas	Afecta propiedades dieléctricas, aumentando el riesgo de fallas eléctricas
Perdida de flexibilidad	El material se vuelve más rígido y menos flexible debido a cambios moleculares.
Erosión superficial	Desgaste de la superficie que conduce a degradación adicional y menor vida útil.

2.4.2 Factores que Afectan la Degradación

La radiación UV, puede tener un impacto significativo en la degradación de los materiales aislantes utilizados en sistemas fotovoltaicos. Esta degradación puede comprometer las propiedades mecánicas, eléctricas y la integridad estructural del



aislamiento, lo que puede afectar el rendimiento y la vida útil de las instalaciones solares.

[41]

Los materiales aislantes expuestos a la radiación UV-B se degradan de diversas maneras. Estos elementos son:

- Intensidad de la radiación UV-B: Una mayor intensidad de la radiación acelera la degradación del material aislante.
- Duración de la exposición: Una exposición prolongada a la radiación UV-B aumenta el grado de degradación a lo largo del tiempo.
- Composición química del material aislante: Diferentes polímeros y aditivos tienen diferentes niveles de resistencia a la degradación por UV-B.
- Temperatura: Las altas temperaturas aceleran los procesos de degradación causados por la radiación UV-B.
- Humedad: La presencia de humedad puede contribuir a la degradación al facilitar reacciones químicas.
- Esfuerzos mecánicos: Los esfuerzos mecánicos pueden agravar los efectos de la degradación por radiación UV-B. [42]

2.4.3 Métodos para Evaluar la Degradación del Aislamiento

La exposición prolongada a la radiación UV-B puede dañar gravemente los materiales aislantes que se utilizan en los sistemas fotovoltaicos. Es necesario utilizar una variedad de enfoques y técnicas de análisis para evaluar y cuantificar esta degradación. Estos métodos permiten monitorear los cambios en las propiedades del aislamiento a lo largo del tiempo y estimar su vida útil remanente, lo que es esencial para garantizar un



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



rendimiento óptimo y una operación segura de las instalaciones solares [43]. Algunos de los principales métodos para evaluar la degradación del aislamiento son:

- Ensayos de envejecimiento acelerado: Implican exponer los materiales aislantes a condiciones ambientales simuladas, en cámaras de envejecimiento controladas. Esto permite evaluar la degradación en un período de tiempo más corto.
- Análisis de propiedades mecánicas: Se realizan ensayos de tracción, impacto, flexión y dureza para determinar los cambios en las propiedades mecánicas del aislamiento debido a la degradación por radiación UV-B.
- Pruebas de propiedades eléctricas: Incluyen mediciones de resistencia de aislamiento, rigidez dieléctrica y factor de potencia para evaluar el deterioro de las propiedades eléctricas del aislamiento.
- Microscopía: La microscopía óptica y electrónica se utiliza para examinar los cambios superficiales y en la estructura interna del aislamiento, como grietas, erosión y delaminación causadas por la radiación UV-B.
- Análisis termogravimétrico (TGA): Evalúa los cambios en la estabilidad térmica y la composición del aislamiento debido a la degradación, midiendo la pérdida de masa en función de la temperatura.
- Pruebas de intemperismo natural: Implican exponer los materiales aislantes a las condiciones ambientales reales durante períodos prolongados de tiempo, monitoreando su degradación en campo. [44]



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3 Introducción

Este capítulo describe la metodología y los materiales utilizados para realizar la investigación y posterior evaluación del aislamiento de los conductores utilizados en los sistemas de energía solar fotovoltaica.

Cuenta con el proceso detallado del estudio realizado sobre el aislamiento de los cables seleccionados, junto con información del software empleado para el modelado y simulación, además se detalló los módulos empleados con el que se realizó las pruebas sobre las muestras.

Este estudio fue crucial para evaluar el impacto de las radiaciones UV-B en el aislamiento de los cables fotovoltaicos utilizados en sistemas de energía solar, en donde la simulación computacional ayudo a determinar y analizar los cambios en las propiedades mecánicas y eléctricas del aislamiento a lo largo del tiempo. Estos hallazgos son fundamentales para comprender la durabilidad y el rendimiento de los cables fotovoltaicos en condiciones reales de operación.

3.1 Tipo de investigación

La presente investigación se basó en una metodología cuantitativa, limitada al análisis mediante simulación computacional, con el objetivo de evaluar el impacto de la radiación UV-B en el aislamiento de los cables fotovoltaicos, analizando los cambios en sus propiedades mecánicas y eléctricas a lo largo del tiempo. Para ello se emplearon modelos numéricos que permitieron reproducir las condiciones de exposición y obtener



los datos sobre el deterioro del aislamiento. Estos resultados serán fundamentales para comprender la durabilidad y rendimiento de los cables en entornos reales de operación.

3.2 Metodología para el modelado y simulación de las muestras

El tema propuesto se abordó mediante una simulación computacional, con el objetivo de evaluar de manera virtual cómo las radiaciones UV-B afectan la longevidad del aislamiento de los cables utilizados para conectar los paneles solares con el regulador de carga. A través de modelos computacionales, se simuló la exposición a radiación UV-B en condiciones controladas, permitiendo analizar la degradación del material aislante a lo largo del tiempo.

3.2.1 Método

Con el fin de evaluar el impacto de la radiación UV-B en el aislamiento de cables utilizados en sistemas de energía solar fotovoltaica, se diseñó una metodología integral. En este se describió el procedimiento de la simulación computacional mediante un proceso sistemático para la selección, modelado y análisis de muestras de diversos materiales aislantes comúnmente utilizados en sistemas de energía solar fotovoltaica. Se recopilaron las dimensiones y especificaciones necesarias para su análisis mediante simulación computacional, en donde se modeló cada uno de los conductores seleccionados para las pruebas. Posteriormente, se sometieron estas muestras a exposición controlada de radiación UV-B, siguiendo los parámetros previamente definidos en términos de tiempo y condiciones ambientales.

Los datos obtenidos se analizaron para determinar la degradación del aislamiento, proporcionando información crucial para mejorar la durabilidad y eficiencia de los



sistemas fotovoltaicos. A partir de estos resultados, se elaboró un análisis comparativo final entre las muestras seleccionadas para ver su comportamiento frente a estas condiciones de exposición.

3.2.2 *Enfoque*

Al ser un tema abordado mediante simulación computacional, se obtuvieron datos numéricos y análisis virtuales sobre el comportamiento y deterioro de los materiales bajo condiciones atmosféricas simuladas, siendo crucial para entender y predecir los efectos de la degradación en instalaciones solares. Esto permitió que el estudio sea relevante, ya que proporciona predicciones y escenarios virtuales detallados que pueden ser extrapolados a diferentes condiciones ambientales, ofreciendo información valiosa para la industria de energía solar fotovoltaica. La simulación permitió evaluar el impacto de factores como la radiación UV y la temperatura en la vida útil de los materiales, optimizando así el diseño y la selección de componentes para mejorar la eficiencia y durabilidad de los sistemas solares.

- **Simulación Computacional:**

- **Degradación con COMSOL Multiphysics:** Predecir la degradación de los aislamientos eléctricos bajo exposición a radiaciones UV-B, considerando factores como intensidad de la radiación, temperatura y tiempo de exposición.
- **Análisis de Ciclos de Vida:** simulaciones para realizar un análisis de ciclo de vida del aislamiento eléctrico, evaluando el impacto a largo plazo de la exposición a UV-B en su longevidad y desempeño.

- **Enfoque comparativo:**



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



- **Comparación de Diferentes Materiales:** Evaluar y comparar la resistencia a la radiación UV-B de diferentes tipos de aislamientos utilizados como PV1-F, PV-Wire, H1Z2Z2-K y USE-2.

3.2.3 Evaluación

Para la ejecución y evaluación, se realizó una simulación computacional que replicó las condiciones atmosféricas a las que se encuentra expuesto el conductor, en la cual se modeló el comportamiento de los distintos materiales previamente seleccionados. La simulación se configuró para representar los lapsos de tiempo establecidos previamente, permitiendo monitorear de manera continua los cambios en los materiales.

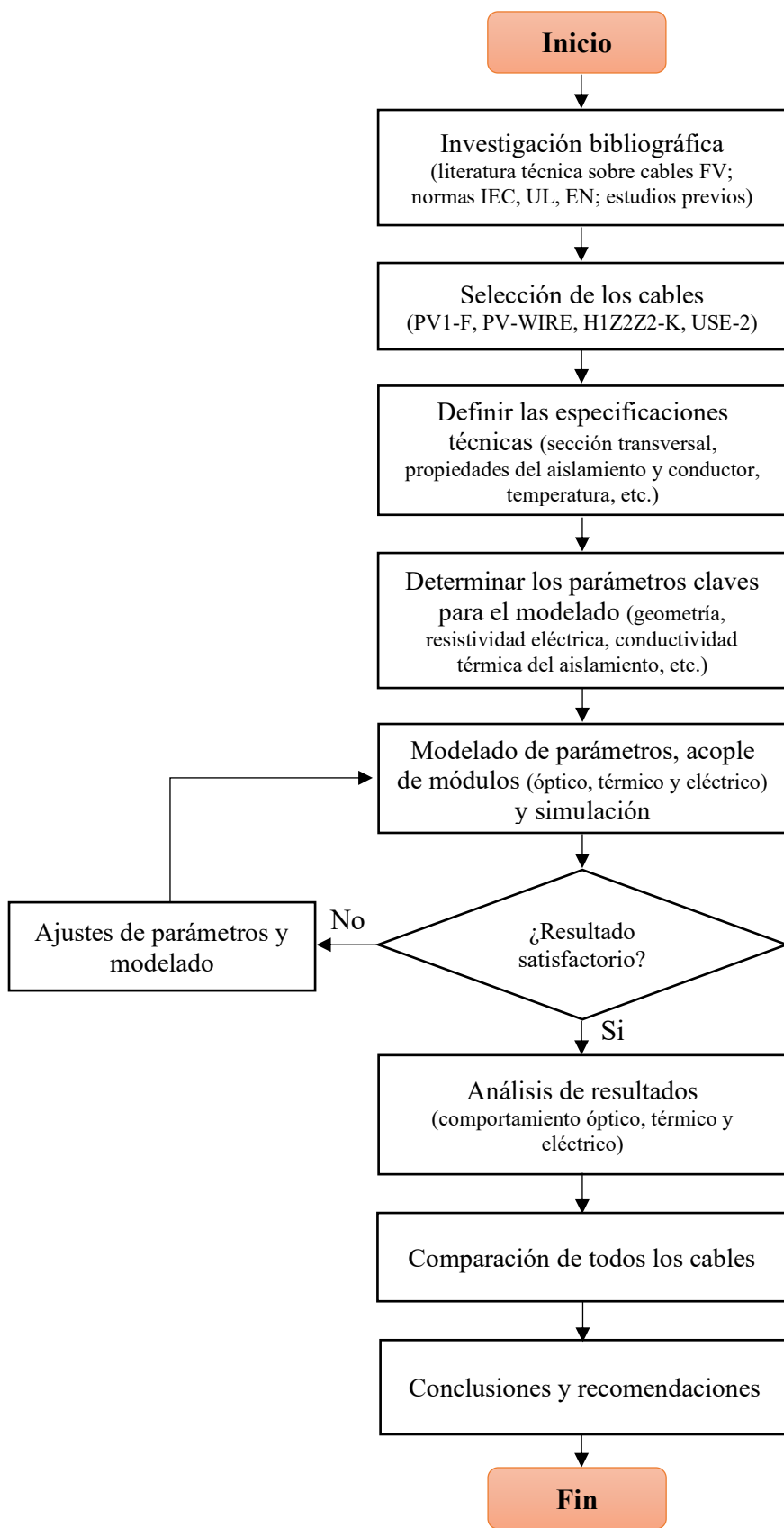
Se realizaron evaluaciones virtuales en cada uno de los aislamientos para identificar los cambios que estos sufrieron durante el periodo de exposición simulado. Una vez finalizadas las pruebas virtuales, la simulación continuó hasta completar el lapso total previsto, lo que permitió obtener datos detallados sobre la degradación acumulada y predecir el comportamiento de los materiales a largo plazo. Este enfoque proporcionó una evaluación eficiente y controlada, reduciendo la necesidad de experimentación física y permitiendo la exploración de múltiples escenarios de manera rápida y precisa.

3.2.4 Flujograma

Se ha establecido un modelo metodológico con el cual se realizó el proceso de evaluación y obtención de datos. Este modelo se articuló mediante una secuencia de pasos, estos llevaron el estudio hacia la culminación de las pruebas y datos requeridos, y el documento final.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO





3.3 Software

COMSOL Multiphysics es un software de simulación de propósito general utilizado en ingeniería, fabricación e investigación científica, que ofrece funciones de modelado multifísico y monofísico totalmente acopladas con herramientas intuitivas para el desarrollo de aplicaciones de simulación. El software incluye módulos complementarios especializados para electromagnetismo, mecánica estructural, acústica, flujo de fluidos, transferencia de calor e ingeniería química, además de productos de interfaz para CAD y programas de terceros, todos conectados perfectamente para un flujo de trabajo de modelado uniforme. Permite compartir el valor de la simulación con equipos de diseño, departamentos de fabricación, laboratorios de pruebas y colaboradores mediante la distribución de aplicaciones a través de COMSOL Compiler y COMSOL Server. [45]

3.4 Módulos empleados en la simulación

Para simular el impacto de la radiación UV-B en las propiedades mecánicas y eléctricas del asilamiento de los cables en COMSOL Multiphysics, fue necesario combinar varios módulos y enfoques, por esta razón se hizo uso de los siguientes módulos:

- Óptica de rayos (para la incidencia y absorción de radiación UV-B).
- Transferencia de Calor en Sólidos (efectos térmicos de la radiación).
- Corrientes eléctricas (evaluar la distribución de corriente y el impacto del calentamiento en el comportamiento eléctrico).



3.4.1 Módulo de Transferencia de Calor en Sólidos

El módulo de transferencia de calor permite modelar, simular y estudiar cómo se produce la transferencia de calor en sólidos mediante conducción, convección y radiación. Este módulo ofrece una amplia variedad de herramientas que permiten analizar tanto el rendimiento térmico de distintos diseños como el impacto de las cargas de calor [46]. Además, facilita la simulación de la distribución de temperaturas y los flujos de calor en componentes, estructuras y edificaciones. Fue útil para analizar efectos térmicos, como los causados por la radiación UV-B, que puede provocar cambios de temperatura y gradientes térmicos en los materiales.

3.4.2 Módulo de Corrientes eléctricas

En este módulo permite analizar de manera eficiente el comportamiento de dispositivos resistivos y conductores, simulando corrientes continuas, alternas o transitorias. En condiciones estáticas o de baja frecuencia, donde los efectos magnéticos son despreciables, el modelado de las corrientes eléctricas es suficiente para obtener resultados precisos. Basado en la ley de Ohm, facilita el cálculo del potencial eléctrico y, a partir de este, propiedades como resistencia, conductancia, campo eléctrico, densidad de corriente y disipación de energía [47]. Además de análisis estacionarios, el módulo permite estudios en dominios de tiempo y frecuencia, considerando también los efectos capacitivos y el análisis de pequeñas señales. Este fue útil para evaluar el deterioro de las propiedades eléctricas de los materiales, como la pérdida de resistencia o cambios en la conductividad bajo condiciones adversas.



3.4.3 Módulo de Óptica de rayos

El módulo de óptica de rayos permite simular la propagación de ondas electromagnéticas utilizando el enfoque de trazado de rayos. En este módulo, las ondas se representan como rayos que pueden sufrir fenómenos de reflexión, refracción, absorción y dispersión [48]. Al integrarse con otros módulos, este complemento permite realizar trazados de rayos en medios con gradientes térmicos o en estructuras deformadas, lo que facilita un análisis detallado del comportamiento estructural, térmico y óptico. Esta se basa en la óptica geométrica y permite modelar sistemas complejos con múltiples superficies y materiales.

3.5 Ecuaciones matemáticas de los módulos dentro del software

El software COMSOL Multiphysics cuenta con distintos módulos para diferentes tipos de simulaciones, cada uno de sus módulos incorpora ecuaciones matemáticas que modelan diversas variables en el tiempo y espacio, aportando un conjunto de ecuaciones fundamentales que, al combinarse, permiten una evaluación integral del deterioro del aislamiento eléctrico en sistemas fotovoltaicos. Para analizar el efecto de la radiación UV-B en la durabilidad del aislamiento eléctrico de los cables fotovoltaicos, es crucial entender las ecuaciones que rigen estos módulos, ya que permiten evaluar con precisión los cambios en sus propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas.

3.5.1 Formulas empleadas por el módulo Transferencia de Calor en Sólidos

Este módulo permitió modelar los procesos de conducción térmica en materiales sólidos, lo cual facilitó observar como la radiación UV-B absorbida genera un aumento de temperatura en el aislamiento del cable.



3.5.1.1 Ecuación de transferencia de calor en sólidos

La ecuación (1) es una representación completa del balance de energía térmica en un sólido, considerando conducción, convección y fuentes de calor. Se usa para modelar y simular la distribución y evolución de la temperatura en sólidos bajo diversas condiciones. Esta ecuación permite predecir como el calor se propaga por conducción, convección y fuentes de calor internas.

$$pC_p \frac{\partial T}{\partial t} + pC_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (1)$$

Donde:

- p = densidad del material
- C_p = capacidad calorífica a presión constante
- $\frac{\partial T}{\partial t}$ = Derivada parcial de la temperatura T con respecto al tiempo
- $u \cdot \nabla T$ = Transporte de calor por convección
- $\nabla \cdot q$ = Divergencia del flujo de calor, que indica como el calor se distribuye espacialmente
- Q = fuente de calor volumétrica
- Q_{ted} = fuente de calor generado por efectos termoeléctricos

3.5.1.2 Ley de Fourier para conducción de calor

La ecuación (2) conocida como ley de Fourier es la base para modelar la conducción térmica y se usa para calcular como el calor se propaga dentro de un sólido bajo distintas condiciones.



$$q = -K\nabla T \quad (2)$$

Donde:

- q = vector del flujo de calor, indica la cantidad de energía térmica que fluye por unidad de área por unidad de tiempo en una dirección específica
- K = Conductividad térmica del material
- ∇T = Gradiente de temperatura, mide como cambia la temperatura en el espacio

3.5.2 *Formulas empleadas por el módulo de Corrientes eléctricas*

Este módulo analiza como la degradación térmica y fotoquímica del aislamiento eléctrico afecta su comportamiento dieléctrico, evaluando posibles fugas o pérdida de capacidad aislante.

3.5.2.1 **Ecuación de la conservación de la carga eléctrica**

La ecuación (3) es una expresión de la ley de conservación de la carga en un medio conductor. Se usa para modelar el flujo de corriente en materiales conductores.

$$\nabla \cdot J = Q_{j,v} \quad (3)$$

Donde:

- J = vector de densidad de corriente eléctrica
- $\nabla \cdot J$ = divergencia de la densidad corriente eléctrica, una medida escalar que indica la cantidad neta de corriente que sale o entra en un punto dado
- $Q_{j,v}$ = densidad de fuente de corriente volumétrica



3.5.2.2 Densidad de corriente total

La ecuación (4) considera la corriente de conducción, desplazamiento y externas. Es esencial para modelar sistemas eléctricos porque combina las diferentes contribuciones al flujo de corriente eléctrica.

$$J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \quad (4)$$

Donde:

- J = Vector de densidad de corriente total
- σE = Corriente de conducción
- $\frac{\partial D}{\partial t}$ = derivada temporal del desplazamiento eléctrico
- J_e = Densidad de corriente externa

3.5.2.3 Definición del campo eléctrico en función del potencial eléctrico.

La ecuación (5) permite al software construir el campo eléctrico a partir del potencial eléctrico, lo cual es esencial para simular conducción eléctrica, cargas eléctricas y flujos de corriente.

$$E = -\nabla V \quad (5)$$

Donde:

- E = vector de Campo eléctrico
- ∇V = Gradiente del potencial eléctrico, un vector que apunta en la dirección de mayor aumento de potencial eléctrico



3.5.3 Formulas empleadas por el módulo Óptica de rayos

Este módulo permitió modelar la propagación, absorción y dispersión de la radiación UV-B al incidir en el aislamiento del cable, permitiendo calcular la distribución espacial de la energía absorbida.

3.5.3.1 Ecuaciones de Hamilton para la óptica geométrica

La ecuación (6) indica que la velocidad del rayo (trayectoria) está determinada por la derivada de la frecuencia angular con respecto al vector de onda, esto significa que el rayo se propaga en la dirección K con una velocidad proporcional.

En la ecuación (7) describe como cambia el vector de onda (dirección del rayo) debido a variaciones espaciales en las propiedades del medio, como un índice de refracción que varía con la posición. Estas ecuaciones describen como los rayos se mueven y se desvían en un medio, teniendo en cuenta refracción y sus variaciones espaciales.

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (6)$$

$$\frac{dk}{dt} = -\frac{\partial \omega}{\partial q} \quad (7)$$

Donde:

- q = vector de posición del rayo (ubicación del rayo en el espacio)
- k = Vector de onda (dirección y magnitud de la propagación del rayo)
- ω = Frecuencia angular de la onda
- $\frac{dq}{dt}$ = velocidad del rayo



- $\frac{\partial \omega}{\partial k}$ = gradiente de la frecuencia angular con respecto al vector de onda
- $\frac{\partial \omega}{\partial q}$ = gradiente de la frecuencia angular con respecto a la posición
- $\frac{dk}{dt}$ = tasa de cambio del vector de onda

3.6 Procedimiento para el modelado y construcción de los cables FV

Para el análisis del comportamiento de los cables fotovoltaicos bajo radiación UV-B, se desarrolló un modelo computacional utilizando COMSOL Multiphysics. La metodología adoptada se basó en la representación bidimensional (2D) de la sección transversal del cable, lo que facilitó el estudio detallado de los fenómenos físicos involucrados.

La estrategia de modelado contempló el acoplamiento multifísico entre los dominios térmico, eléctrico y óptico, permitiendo evaluar de manera integral la respuesta del sistema ante la exposición a radiación UV-B. La selección del entorno bidimensional se justificó por la necesidad de optimizar los recursos computacionales sin comprometer la precisión de los resultados, considerando que los gradientes más significativos se presentan en el plano transversal de la estructura del cable.

3.6.1 Geometría del cable

El modelado del cable fotovoltaico se desarrolló mediante una representación bidimensional de su sección transversal con arquitectura de dominios concéntricos, que incluye un núcleo conductor de cobre estañado o cobre (según el tipo de cable FV), capas de aislamiento interno y cubierta exterior de poliolefina reticulada (XLPO) o polietileno reticulado (XLPE), y el dominio del aire para reproducir las condiciones reales de



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



transferencia de calor por convección natural y radiación, siendo esta última consideración especialmente importante para evaluar la interacción del cable con la radiación UV-B y predecir adecuadamente su comportamiento térmico.

Para ello se aplicó una geometría rectangular de 100 mm de ancho y 3.15 mm de altura, el cual representaría el largo del cable y el diámetro del cable respectivamente, el resultado es el mostrado en la Fig. 6 obteniendo así una la sección transversal del conductor de cobre o cobre estañado dependiendo el tipo de cable.

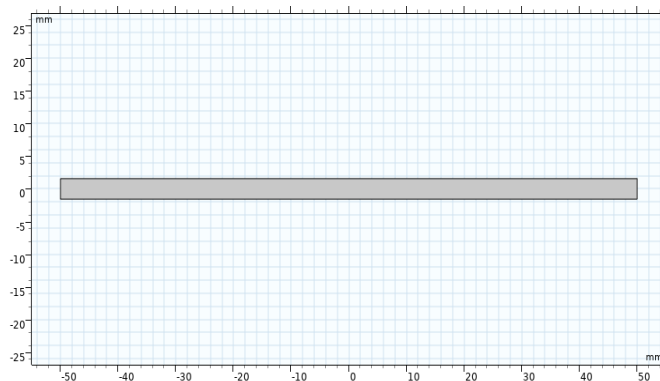


Fig. 6 Modelado 2D del conductor para el cable PV1-F

Para el aislamiento interior se sumó 0.7 mm para cada lado, dando un total de 1.4 mm (para el caso del cable PV1-F) a las medidas del cable , el cual corresponde al grosor que tendría el aislamiento, dando así 101.4 mm de ancho y 4.55 mm de altura, representando de igual manera el largo del cable y el diámetro del cable con todo y aislamiento, a esto se aplicaría un booleano de diferencia el cual permite que ambos dominios del conductor y aislamiento no se monten uno sobre otro, el resultado sería el mostrado en la Fig. 7 obteniendo así una la sección transversal del cable con el cable y el aislamiento.

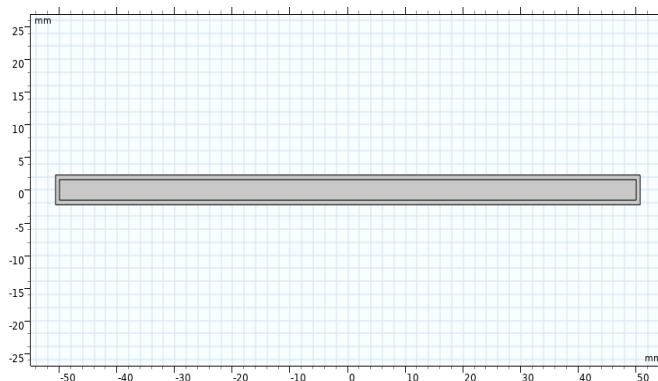


Fig. 7 Modelado 2D del conductor con aislamiento del cable PV1-F

De la misma manera se agregó el dominio de la cubierta donde se sumó 0.8 mm (para el caso del cable PV1-F) a las medidas del cable con el aislamiento, con un total de 1.6 mm, el cual corresponde al grosor que tiene la cubierta, obteniendo 103 mm de ancho y 6.15 mm de altura, el resultado sería el mostrado en la Fig. 8 representando así la sección transversal del cable fotovoltaico PV1-F.

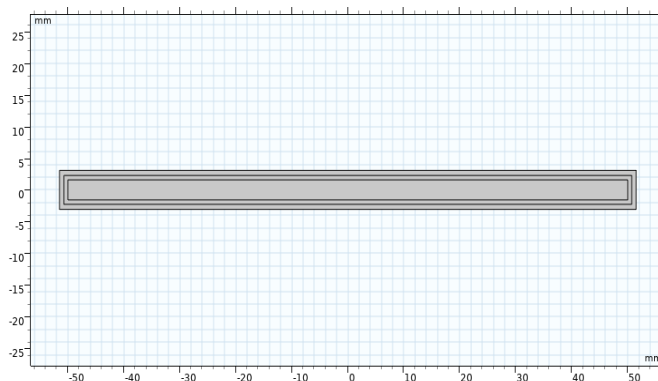


Fig. 8 Modelado del cable PV1-F

Para finalizar se agregó el dominio del aire con un área mayor al del cable, en este caso sus medidas fueron de 150 mm de ancho y 50 mm de altura, el resultado sería el mostrado en la Fig. 9 obteniendo así lo necesario para realizar el estudio.

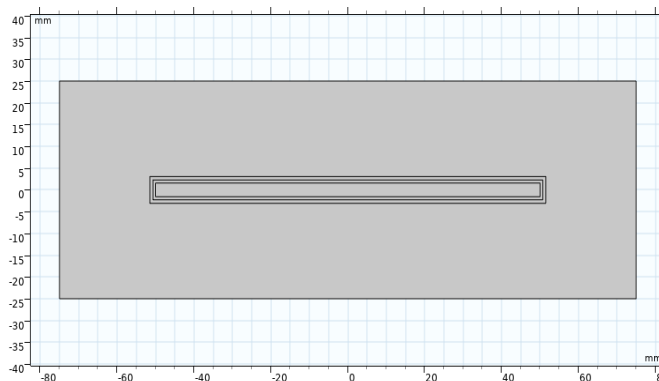


Fig. 9 Geometría final del cable en el dominio del aire

Cada componente se basó en especificaciones técnicas del cable FV, asegurando la representatividad del modelo respecto a las condiciones operativas reales. Para el modelado de los otros cables se modificó las dimensiones de acuerdo con cada especificación técnica de los cables fotovoltaicos seleccionados.

3.6.2 Asignación de materiales y propiedades

En la caracterización de materiales se definió las propiedades físicas de cada componente como las de la Tabla 10. El conductor utiliza cobre estañado, aleación que combina la alta conductividad eléctrica del cobre con la protección anticorrosiva del estaño, aspectos críticos para el desempeño a largo plazo en instalaciones fotovoltaicas.

Tabla 10 Propiedades básicas del conductor de cobre estañado

Nombre	Valor	Unidad
Conductividad eléctrica	5.8e7	S/m
Capacidad calorífica con presión constante	385	J/(kg·K)
Permitividad relativa	1	1
Densidad	8960	kg/m ³
Conductividad térmica	385	W/(m·K)



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



Las capas poliméricas de aislamiento interno y cubierta protectora se caracterizaron mediante poliolefina reticulada (XLPO) en otros casos (XLPE), material seleccionado por su destacada resistencia a la degradación fotoquímica por radiación ultravioleta y su baja conductividad térmica, que minimiza pérdidas de calor y contribuye a la estabilidad térmica del sistema. En la tabla 11 y 12 se destaca las Propiedades básicas de la poliolefina reticulada XLPO y polietileno reticulado XLPE.

Tabla 11 Propiedades básicas de la poliolefina reticulada XLPO

Nombre	Valor	Unidad
Conductividad térmica	0.2	W/(m·K)
Densidad	940	kg/m ³
Capacidad calorífica con presión constante	1900	J/(kg·K)

Tabla 12 Propiedades básicas del polietileno reticulado XLPE

Nombre	Valor	Unidad
Conductividad térmica	0.38	W/(m·K)
Densidad	930	kg/m ³
Capacidad calorífica con presión constante	2000	J/(kg·K)

El medio circundante se representó con las propiedades del aire a condiciones ambientales normales, fundamental para simular correctamente la propagación de los rayos y los mecanismos de transferencia de calor. En la tabla 13 se destaca las propiedades básicas del aire.

**Tabla 13** Propiedades básicas del aire dadas por el software

Nombre	Valor	Unidad
Conductividad térmica	0.0262	W/(m·K)
Densidad	1.225	kg/m ³
Capacidad calorífica con presión constante	1005	J/(kg·K)

3.6.3 Implementación de módulos

Para llevar a cabo la simulación, fue necesario desarrollar diferentes componentes que reprodujeran de forma precisa los fenómenos que se quería estudiar. Estos componentes trabajaron de manera conjunta para examinar cómo interactúan los aspectos térmicos, eléctricos y ópticos en el interior del cable.

- **Nodos empleados en el módulo de Transferencia de Calor en Sólidos**

El módulo de Transferencia de Calor en Sólidos se utilizó para estudiar el incremento de temperatura en la cubierta, el aislamiento y en el conductor como resultado de la energía absorbida por la radiación UV-B. Este módulo permitió analizar cómo se distribuye el calor en el tiempo y el espacio, así como su conducción entre los distintos materiales. Para ello se emplearon dos nodos específicos de Flujo de calor para representar las fuentes internas de generación de calor. El nodo Flujo de calor 1 se asignó al dominio de la cubierta exterior del cable, donde se concentró la absorción de energía óptica proveniente del módulo de Óptica de Rayos. Esta energía absorbida se transformó en calor, representando el efecto directo de la radiación UV-B sobre la superficie del aislamiento. Por otro lado, el nodo Flujo de calor 2 se aplicó al dominio del conductor de cobre estañado, utilizando una densidad de pérdida volumétrica que simula el



calentamiento resistivo interno (efecto Joule) generado por el paso de corriente eléctrica. La combinación de estos dos mecanismos permitió evaluar cómo la temperatura se distribuye y evoluciona en el tiempo dentro del cable, lo cual es esencial para predecir el deterioro térmico de los materiales.

- **Nodos empleados en el módulo de Óptica de rayos**

El módulo de Óptica Geométrica se utilizó para modelar la propagación de la radiación UV-B a través de los diferentes dominios del cable fotovoltaico, simulando el comportamiento de los rayos en medios materiales. Esta radiación, con una longitud de onda característica de 297.5 nm (UV-B), fue configurada mediante el nodo Propiedades del rayo, definiendo así el tipo de radiación incidente sobre el sistema. Para simular la interacción óptica entre los rayos y los materiales del modelo, se emplearon distintos nodos de Propiedades de medio: uno para el aire exterior, y uno específico para cada uno de los dominios sólidos (cubierta, aislamiento y conductor). En cada uno de estos nodos se definieron los índices de absorción y refracción, lo cual fue crucial para determinar cuánta energía del rayo se absorbe y cuánta se transmite o refleja, permitiendo calcular con precisión el calentamiento inducido por la radiación. La emisión de los rayos se configuró a través del nodo Release from Boundary 1, donde se especificó la cantidad total de rayos emitidos, su dirección, la intensidad inicial y la potencia asociada a cada rayo. Este nodo definió las condiciones de entrada de la radiación UV-B desde el entorno hacia la superficie del cable.

La interacción de los rayos con cada dominio se modeló utilizando el nodo Scattering Domain 1 y varias condiciones de contorno tipo pared, las cuales fueron claves



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



para definir el comportamiento en las interfaces. Estas incluyen: pared cubierta, pared aislamiento, pared conductor y pared aire, donde se configuró el grado de transmisión y reflexión en cada límite, tomando en cuenta las propiedades ópticas de cada material. Finalmente, el nodo Terminación de rayo 1 permitió definir cuándo y cómo deben finalizar los rayos dentro del dominio, evitando trayectorias innecesarias que no contribuyen al calentamiento.

Este conjunto de nodos y configuraciones permitió simular con precisión cómo la radiación UV-B interactúa con los materiales del cable, permitiendo cuantificar la energía absorbida por cada región y generar, a partir de esta, una fuente de calor que alimenta el módulo de transferencia térmica.

- **Nodos empleados en el módulo de Corrientes eléctricas**

El módulo de Corrientes Eléctricas se utilizó para modelar el flujo de corriente continua a través del cable fotovoltaico, con el objetivo de analizar el comportamiento eléctrico del conductor y del aislamiento bajo condiciones térmicas generadas por la exposición prolongada a la radiación UV-B. Este módulo permitió resolver la distribución del potencial eléctrico, la densidad de corriente y la potencia disipada por efecto Joule, aspectos fundamentales para evaluar el rendimiento del cable ante condiciones de operación prolongadas.

Se empleó el nodo Terminal 1 en el extremo derecho del conductor, donde se definieron las propiedades eléctricas de entrada, como el voltaje aplicado o la corriente suministrada, representando el punto de conexión al generador fotovoltaico. En el extremo opuesto (izquierdo) se colocó el nodo Tierra 1, el cual actúa como referencia de



potencial eléctrico (0 V), cerrando así el circuito de simulación y permitiendo resolver el gradiente de potencial a lo largo del conductor. Para asegurar que el flujo de corriente se mantenga confinado dentro del conductor y no se disipe hacia el entorno, se utilizó el nodo Aislamiento eléctrico 1 en los bordes superior e inferior del dominio del conductor.

Esta configuración nodal permitió simular de forma precisa el paso de corriente eléctrica por el conductor, su disipación por calentamiento resistivo, y su interacción indirecta con el entorno térmico generado por la radiación UV-B. Los resultados obtenidos con este módulo son clave para evaluar posibles pérdidas eléctricas, gradientes de temperatura por efecto Joule, y el envejecimiento eléctrico del aislamiento a lo largo del tiempo.

3.6.4 Mallado

La implementación de una malla extremadamente fina basada en elementos triangulares ofreció una flexibilidad superior para adaptarse a las geometrías del cable. Esta configuración resultó especialmente ventajosa para resolver los fenómenos multifísicos complejos que caracterizan el comportamiento del sistema.

Como se observa en la Fig. 10, este presentó un mallado extremadamente fino con la finalidad de garantizar un mejor análisis y confiabilidad de los resultados obtenidos. Esta logro ser muy efectivo para capturar adecuadamente los distintos fenómenos físicos involucrados.

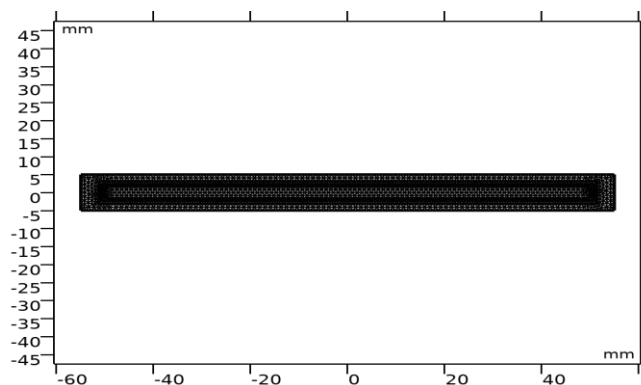


Fig. 10 Mallado del modelo del cable en el dominio del aire

3.6.5 Estudio y configuración temporal

El análisis se planteó de forma dinámica para poder observar cómo se comportaba el cable durante diferentes períodos de tiempo mientras está expuesto de manera constante a radiación UV-B. Se establecieron intervalos de simulación que cubren los tiempos del deterioro del cable: 1 mes, 3 meses, 6 meses, 1 año, 5 años y 10 años.

La configuración temporal del estudio se estableció utilizando el mes como unidad fundamental para capturar la evolución gradual. Se definió un horizonte temporal de diez años (120 meses), con frecuencia de muestreo mensual que permitió identificar patrones estacionales y tendencias de degradación a largo plazo. La configuración incluyó la definición del instante inicial, intervalos de captura de datos y duración total del estudio, contemplando la activación simultánea de todos los módulos físicos y sus acoplamientos multifísicos tal y como se muestra en la Fig. 11 para obtener un conjunto completo de variables de respuesta, desde la evolución de propiedades térmicas hasta cambios en características eléctricas y ópticas. Esta escala temporal responde a la necesidad de evaluar efectos acumulativos de la radiación ultravioleta, cuya



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



manifestación requiere períodos prolongados de exposición para producir cambios detectables en las propiedades del material.

Etiqueta:

▼ Configuración del estudio

Unidad del tiempo:

Tiempos de salida: Ms

Tolerancia:

► Resultados mientras resuelve

▼ Selección de físicas y variables

Modificar configuración de modelo para paso de estudio

►►	Interfaz de física	Resuelve para	Forma de ecuación
<input checked="" type="radio"/>	Óptica geométrica (g...	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático (Te...
<input checked="" type="radio"/>	Transferencia de calor...	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático (Te...
<input checked="" type="radio"/>	Corrientes eléctricas (...)	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático (Te...

►►	Acoplamientos de m	Resuelve para	Forma de ecuación
<input checked="" type="radio"/>	Fuente de calor por...	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático (Temp...
<input checked="" type="radio"/>	Calentamiento elec...	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático (Temp...

Fig. 11 Captura de la interfaz del estudio temporal



CAPITULO IV

ANALISIS Y RESULTADOS

4 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a través de la simulación de la radiación UV-B sobre los cables fotovoltaicos. Se analizó el comportamiento de los aislamientos frente a la radiación, su respuesta térmica, así como el comportamiento eléctrico del cable. Cada uno de estos aspectos se estudió en los distintos periodos de tiempo asignados, culminando con una comparación final del desempeño de los cables. En primer lugar, se examinó cómo respondió el aislamiento de cada cable fotovoltaico ante la exposición a la radiación UV-B. Luego, se evaluó el comportamiento térmico de los diferentes cables, con el objetivo de evidenciar el grado de degradación y la resistencia del aislamiento frente a las diversas fuentes de calor. Se analizó el comportamiento eléctrico del cable para determinar si el deterioro del aislamiento afecta al conductor y a sus propiedades eléctricas. Finalmente, se presentó una comparación general entre los cables, lo que permite comprender con mayor claridad el desempeño de cada uno frente a las condiciones simuladas.

4.1 Resultados de la simulación.

Utilizando los módulos de Óptica de Rayos, Transferencia de Calor en Sólidos y Corrientes Eléctricas del software, se examina el rendimiento óptico, térmico y eléctrico de los cables a lo largo de su ciclo de vida. Los resultados obtenidos incluyen mapas térmicos, patrones de absorción y reflexión de la radiación UV-B, así como distribuciones de voltaje y campo eléctrico para cada tipo de cable bajo las condiciones definidas. Esta



información se presenta mediante gráficas que sirven como base para un análisis del comportamiento de los cables a medida que aumenta su tiempo de exposición.

4.1.1 Comportamiento a la Trayectoria de rayos

Estos resultados examinaron el comportamiento de los distintos cables al estar expuestos a la radiación UV-B. Durante este estudio se analizó su comportamiento frente a la trayectoria de los rayos, su absorción, reflexión y la respuesta que tendrán los distintos aislamientos a los rayos, lo que brinda una visión de su funcionamiento frente a este tipo de radiación.

4.1.1.1 Cable PV1-F

El resultado de la simulación presentada en la Fig. 12 representa la trayectoria de los rayos UV-B sobre el cable fotovoltaico PV1-F. Los rayos, representados por líneas rojas, inciden verticalmente desde el borde superior del dominio de aire con una intensidad de 2.5 W/m^2 . La mayor parte de esta radiación se concentra en la cubierta de XLPO, atravesando parcialmente el aislamiento exterior y propagándose en toda la superficie sin llegar hacia el conductor. También se observó una ligera reflexión de los rayos, pero con menor intensidad, lo cual indica que parte de la energía ha sido absorbida por el material.

Esta interacción óptica localizada provoca una acumulación de energía en la zona superior del aislamiento, lo que con el tiempo puede provocar un incremento localizado de temperatura. Esta condición provoca degradación térmica y fotoquímica en el aislamiento, afectando sus propiedades mecánicas y eléctricas. Además, la penetración parcial de la radiación hacia las capas internas provocará un riesgo de degradación



progresiva, que podría comprometer la integridad estructural y dieléctrica del material a largo plazo.

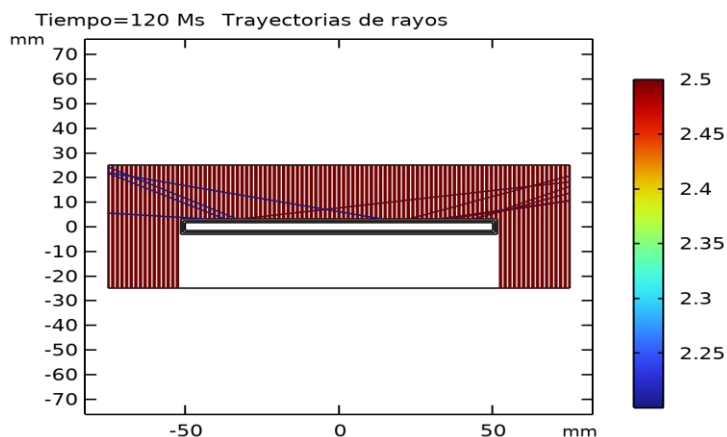


Fig. 12 Proyección de los rayos UV-B en el cable PV1-F (intensidad de 2.5 W/m^2) e interacción con el material aislante

4.1.1.2 Cable PV-Wire

El resultado de la simulación de la trayectoria de rayos UV-B en el cable PV-Wire, al igual que en el caso del cable PV1-F, la radiación incide de forma vertical desde el dominio superior (aire) con una intensidad constante. En la fig. 13 se observó que los rayos atraviesan principalmente la cubierta del cable y penetran de manera significativa hasta el aislamiento. Sin embargo, a diferencia del PV1-F, en este caso una mayor proporción de los rayos logra alcanzar regiones más profundas del material aislante, esto debido a que posee una cubierta menos gruesa. Esta diferencia se evidencia con mayor claridad en el análisis térmico del cable, donde se observa un incremento más marcado en la temperatura. Además, la presencia de trayectorias inclinadas (líneas azules) indica un cambio en la dirección de propagación debido a fenómenos de refracción.

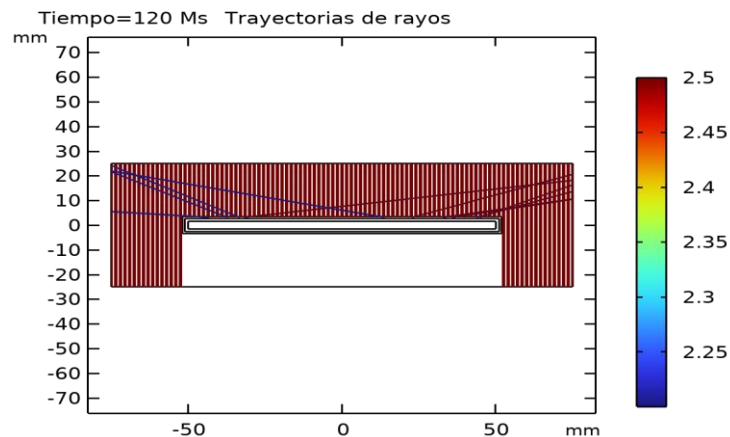


Fig. 13 Proyección de los rayos UV-B en el cable PV-Wire (intensidad de 2.5 W/m^2) e interacción con el material aislante

La simulación óptica muestra un confinamiento en el conductor central, los rayos se propagan en las zonas externas del cable, además, se observan trayectorias irregulares con múltiples reflexiones y patrones de interferencia. Esto confirma que el modelo captura eficazmente tanto la absorción como la dispersión óptica en el sistema. Esta mayor penetración implica un riesgo más elevado de alteración estructural del aislamiento. Por lo tanto, la simulación sugiere que el cable PV-Wire presente un comportamiento más vulnerable frente a una exposición prolongada a radiación UV-B, afectando negativamente su durabilidad y desempeño.

4.1.1.3 Cable H1Z2Z2-K

En el resultado correspondiente al cable H1Z2Z2-K se muestra la trayectoria de los rayos UV-B que inciden desde el dominio del aire. Con dirección vertical se proyecta las líneas de los rayos con una intensidad constante de 2.5 W/m^2 , esto muestra que la radiación interactúa principalmente con la cubierta superior del cable. El resultado óptico de la Fig. 14 indica una distribución bastante homogénea de la radiación UV-B, lo que



sugiere que la radiación es absorbida principalmente en las capas más externas. Esta absorción superficial reduce la profundidad de penetración, lo que puede limitar el alcance de la degradación hacia zonas internas. Este comportamiento indica que la degradación por radiación UV-B podría concentrarse en la superficie de la cubierta y del aislamiento, induciendo envejecimiento superficial, formación de micro fisuras y pérdida progresiva de propiedades mecánicas como flexibilidad o resistencia al agrietamiento.

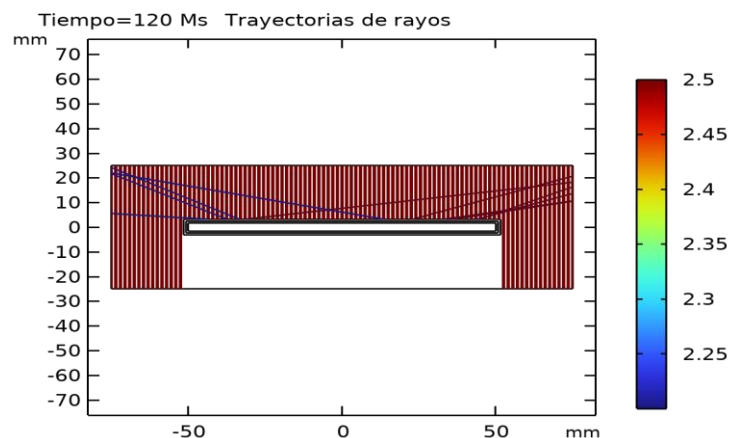


Fig. 14 Proyección de los rayos UV-B en el cable H1Z2Z2-K (intensidad de 2.5 W/m^2) e interacción con el material aislante

4.1.1.4 Cable USE-2

El resultado óptico correspondiente al cable USE-2 indicó una distribución de rayos UV-B ingresando verticalmente desde el borde superior del dominio del aire, con una intensidad constante de 2.5 W/m^2 . Esta radiación se mantiene prácticamente uniforme a lo largo de la cubierta y el aislamiento. Sin embargo, como se muestra en la Fig. 15, la dispersión de los rayos revela una mayor concentración energética 2.43 W/m^2 , lo que indica que el impacto de la radiación es superior en comparación con los aislamientos de los otros cables, generando acumulaciones térmicas significativas en zonas internas. Este



comportamiento se traduce en un envejecimiento acelerado de la superficie del aislamiento, provocando así endurecimiento, pérdida de flexibilidad o formación de micro fisuras. En consecuencia, se evidencia que el aislamiento XLPE presenta un desempeño inferior frente a la radiación UV-B en comparación con el aislamiento XLPO de los otros cables.

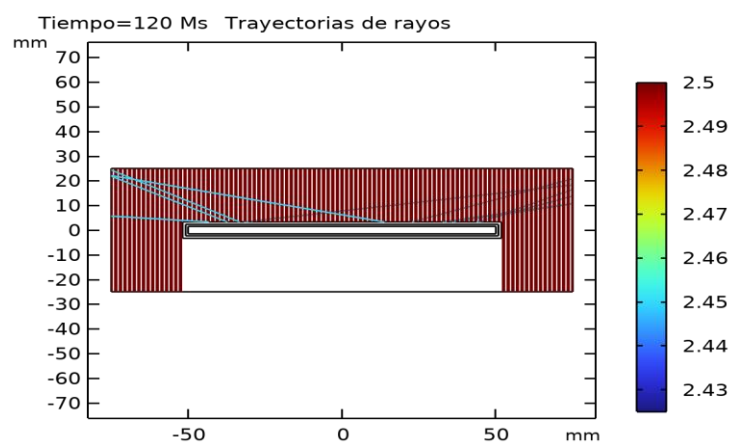


Fig. 15 Proyección de los rayos UV-B en el cable USE-2 (intensidad de 2.5 W/m^2) e interacción con el material aislante

4.1.2 Comportamiento térmico

Estos resultados examinaron el comportamiento térmico de los aislamientos y el cable, evaluando el deterioro de las propiedades mecánicas del aislante bajo condiciones de radiación UV-B otorgadas por el módulo óptica de rayos sumando la temperatura ambiente ($22 \text{ }^\circ\text{C}$). Durante este estudio se analizó su desempeño considerando puntos calientes, posibles alteraciones estructurales y gradientes térmicos.



4.1.2.1 Cable PV1-F

El resultado de la simulación mostro la evolución térmica en la superficie del aislamiento del cable PV1-F a lo largo del tiempo, desde el primer mes hasta los diez años de exposición a la radiación UV-B, en donde se puede observar puntos de calor a lo largo de la superficie del aislamiento como se muestra en la Fig. 16. En las primeras etapas (figuras a, b y c: 1, 3 y 6 meses), la temperatura superficial del aislamiento XLPO se incrementa de manera gradual, pasando de 22.9 °C a 27.8 °C. Este aumento moderado refleja un proceso inicial de absorción de energía sin alteraciones térmicas críticas, aunque ya comienza a evidenciar una acumulación sostenida de calor en el entorno del aislamiento.

En los periodos más prolongados (figuras d, e y f: 1, 5 y 10 años), se observó un incremento térmico considerable. Al año, la temperatura alcanza 33.7 °C, aumentando a 81.1 °C a los 5 años, y finalmente llego a 140 °C a los 10 años. Esta progresión térmica acelerada indica una acumulación significativa de energía en el aislamiento, lo cual sugiere una disminución progresiva de su capacidad para disipar calor, debido a la degradación de sus propiedades térmicas.

La simulación térmica del cable PV1-F revelo un deterioro progresivo del comportamiento térmico del aislamiento bajo exposición prolongada a radiación UV-B. El aumento sostenido de temperatura comprometió directamente la integridad del aislamiento. Estos niveles térmicos pueden inducir pérdida de elasticidad, formación de grietas y, en etapas avanzadas, ruptura del material.

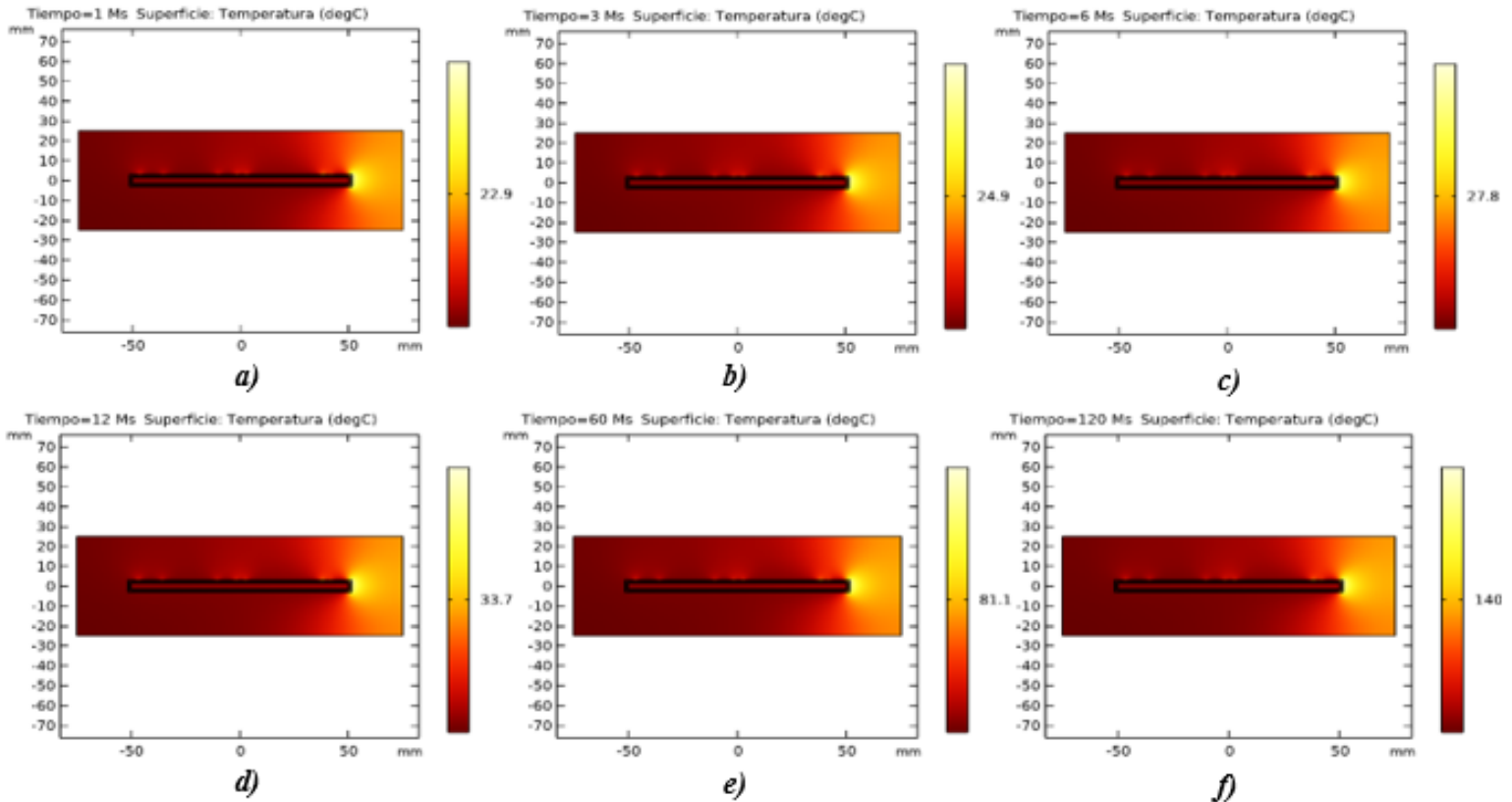


Fig. 16 Evolución térmica en la superficie del aislamiento del cable PV1-F a lo largo del tiempo: a) 1 mes 22.9 °C, b) 3 meses 24.9 °C, c) 6 meses 27.8 °C, d) 1 año 33.7 °C, e) 5 años 81.1 °C, f) 10 años 140 °C

4.1.2.2 Cable PV-Wire

El resultado de la simulación mostro la evolución térmica de la Fig. 17 que representa el comportamiento que tiene el cable PV-Wire bajo exposición continua a radiación UV-B en 10 años. En el primer mes (figura a), la temperatura máxima registrada en la superficie del cable alcanzo los 22.9 °C, lo que indica un incremento térmico moderado atribuible a la absorción de energía óptica en la cubierta exterior. A los 3 meses (figura b), la temperatura se elevó a 25.1 °C, y a los 6 meses (figura c) alcanza los 28.3 °C, reflejando una acumulación progresiva de calor en el cable, principalmente en la zona externa del aislamiento. Este aumento térmico progresivo se vuelve más significativo a partir del primer año (figura d), donde se observó una temperatura superficial de 34.7 °C.



A los 5 años (figura e), el calor acumulado incremento la temperatura a 86.1 °C, indicando un umbral crítico que puede comprometer la integridad del aislamiento, acelerando su degradación estructural y funcional. Finalmente, a los 10 años (figura f), la temperatura máxima alcanzo los 150 °C, lo que evidencia un deterioro térmico severo en las regiones del aislamiento. Este comportamiento indico que el cable PV-Wire, aunque inicialmente presenta un desempeño térmico similar a el PV1-F, termina por acumular mayor energía térmica a largo plazo, esto por la composición del cable en donde este posee una cubierta menos gruesa. Todo esto confirma que el efecto acumulativo de la radiación UV-B tiene un impacto térmico creciente y crítico sobre el aislamiento eléctrico, comprometiendo su durabilidad y funcionalidad en aplicaciones fotovoltaicas expuestas a largo plazo.

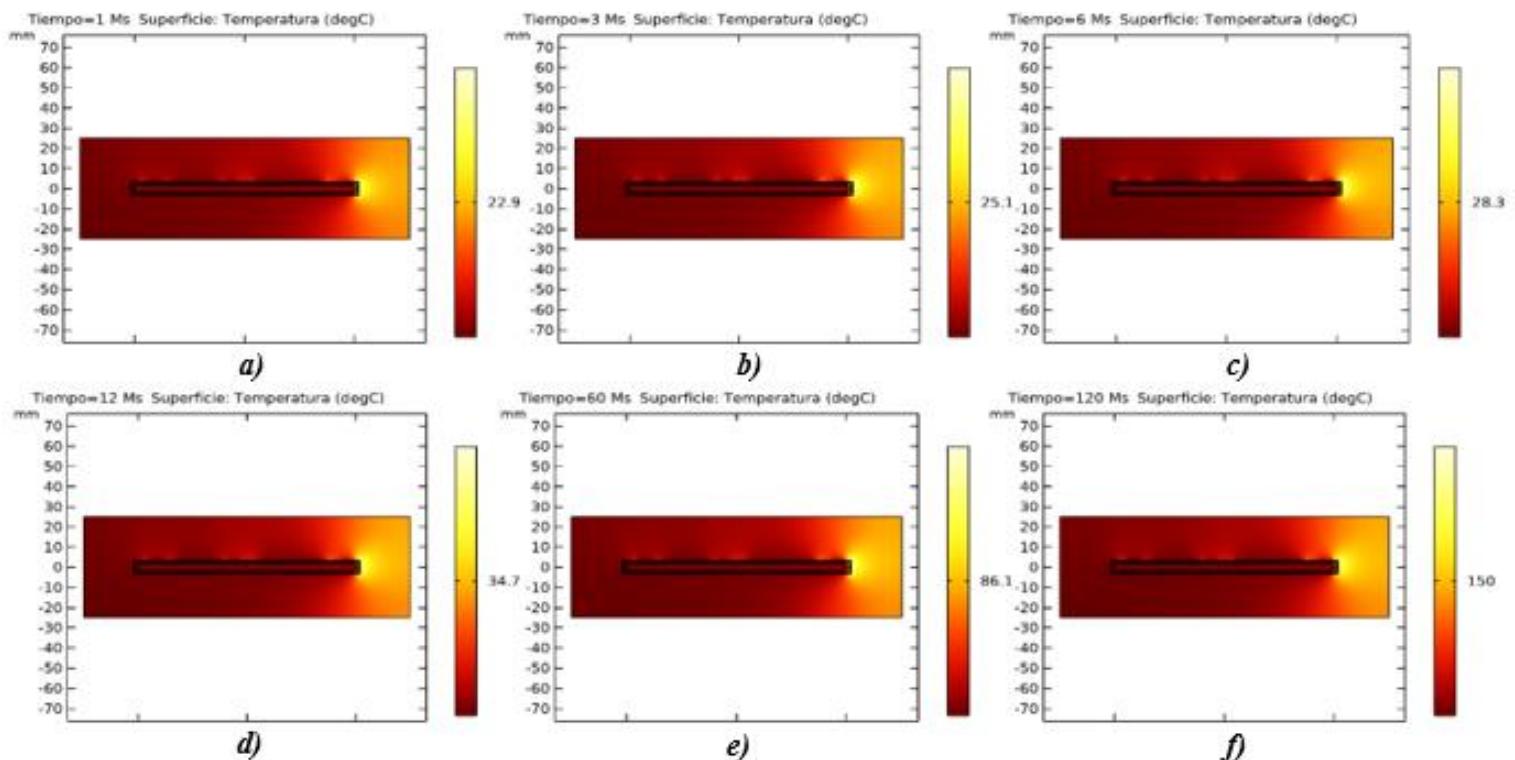


Fig. 17 Evolución térmica en la superficie del aislamiento del cable PV-Wire a lo largo del tiempo: a) 1 mes 22.9 °C, b) 3 meses 25.1 °C, c) 6 meses 28.3°C, d) 1 año 34.7 °C, e) 5 años 86.1 °C, f) 10 años 150 °C



4.1.2.3 Cable H1Z2Z2-K

El resultado de la evolución térmica del cable H1Z2Z2-K expuesto a radiación UV-B a lo largo del tiempo mostro un comportamiento progresivo de acumulación de temperatura en la superficie del aislamiento como se muestra en la Fig. 18, lo que permite evaluar de forma clara el impacto térmico sobre el mismo.

En el primer mes (figura a), la temperatura máxima en la superficie apenas alcanzó los 22.9 °C, evidenciando un estado térmicamente estable con escasa acumulación de calor. Sin embargo, a los 3 meses (figura b), se produjo un incremento moderado hasta los 24.9 °C, seguido de una temperatura de 27.8 °C a los 6 meses (figura c), lo cual sugiere una absorción acumulativa más lenta en comparación con los otros cables analizados. A partir del primer año (figura d), el sistema alcanza los 33.8 °C, lo que indico una aceleración en el calentamiento progresivo del aislamiento exterior. A los 5 años (figura e), experimenta un incremento notable hasta los 81.3 °C, comenzando a acercarse a un umbral térmico donde las propiedades del aislamiento podrían verse comprometidas. Finalmente, a los 10 años (figura f), la temperatura máxima se sitúa en 141 °C, lo que indica un grado avanzado de acumulación térmica.

Aunque el aumento de temperatura es progresivo, el cable H1Z2Z2-K presento un desempeño térmico intermedio, mostrando una mayor resistencia a la acumulación inicial de calor, pero alcanzando valores críticos a largo plazo.

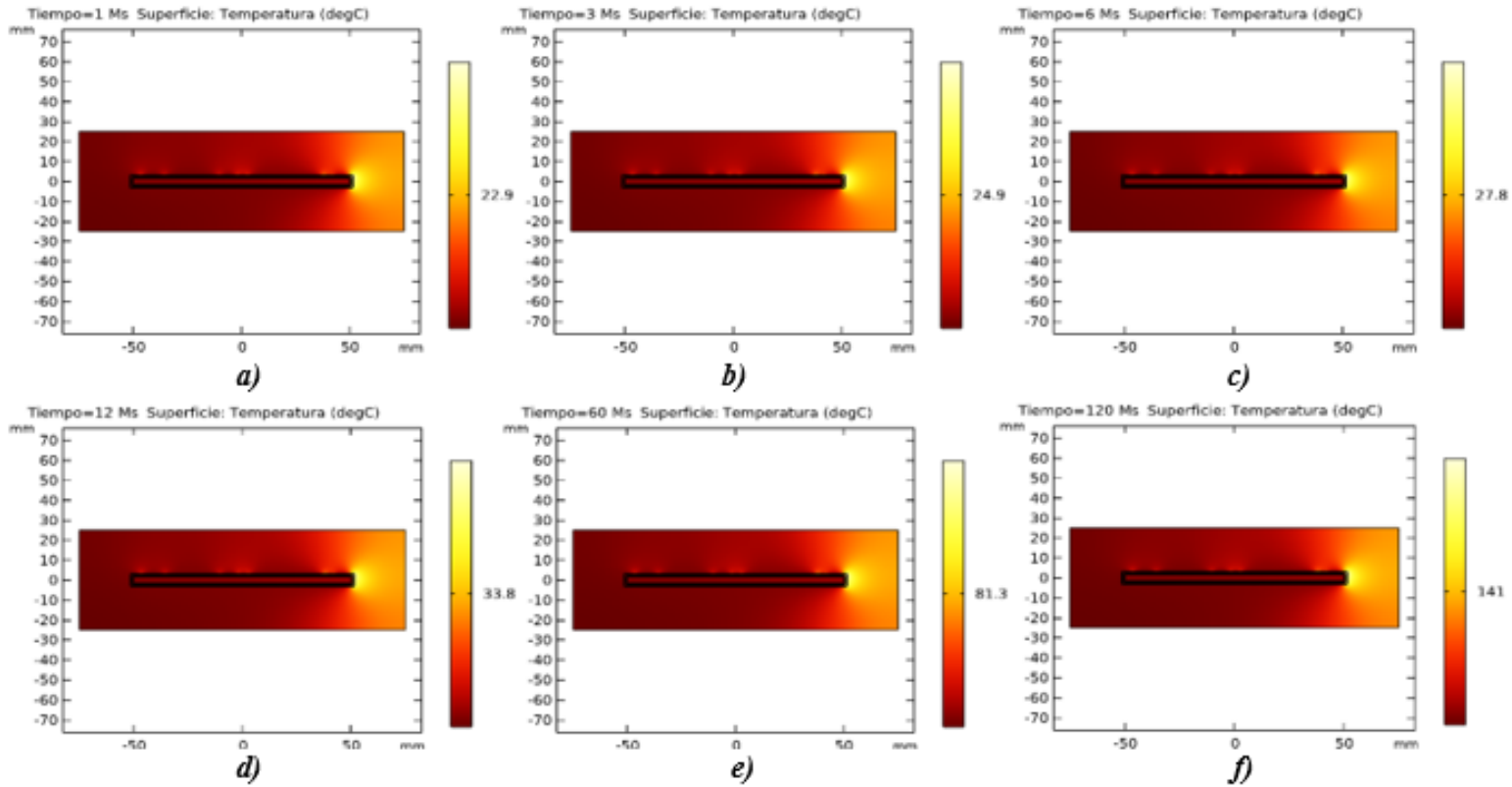


Fig. 18 Evolución térmica en la superficie del aislamiento del cable H1Z2Z2-K a lo largo del tiempo: a) 1 mes 22.9 °C, b) 3 meses 25.1 °C, c) 6 meses 28.3°C, d) 1 año 34.7 °C, e) 5 años 86.1 °C, f) 10 años 150 °C

4.1.2.4 Cable USE-2

El resultado de la evolución térmica de la Fig. 19, representa al cable USE-2 y revelo una tendencia progresiva y significativa en la acumulación de temperatura, lo cual permitió evaluar el impacto potencial sobre la integridad de su aislamiento a largo plazo. En el primer mes (figura a), la temperatura máxima apenas alcanzó los 23 °C, lo que indica una mínima absorción térmica inicial superior a los otros aislamientos. A los 3 meses (figura b), se observó un aumento hasta los 25.4 °C, mientras que a los 6 meses (figura c) la temperatura máxima sube a 28.9 °C, lo cual sugiere una respuesta térmica significativa durante los primeros seis meses de exposición. Sin embargo, a partir del primer año (figura d), con un valor máximo de 36 °C, se empezó a evidenciar una



acumulación más notoria de calor sobre la superficie del aislamiento. Esta tendencia se acentúa drásticamente a los 5 años (figura e), donde la temperatura alcanza los 92.5 °C, acercándose peligrosamente al umbral térmico de degradación del material. Finalmente, a los 10 años (figura f), la temperatura superficial llega a 163 °C, lo cual represento un estado térmico crítico que sugiere un deterioro avanzado del aislamiento, con un alto riesgo de pérdida estructural.

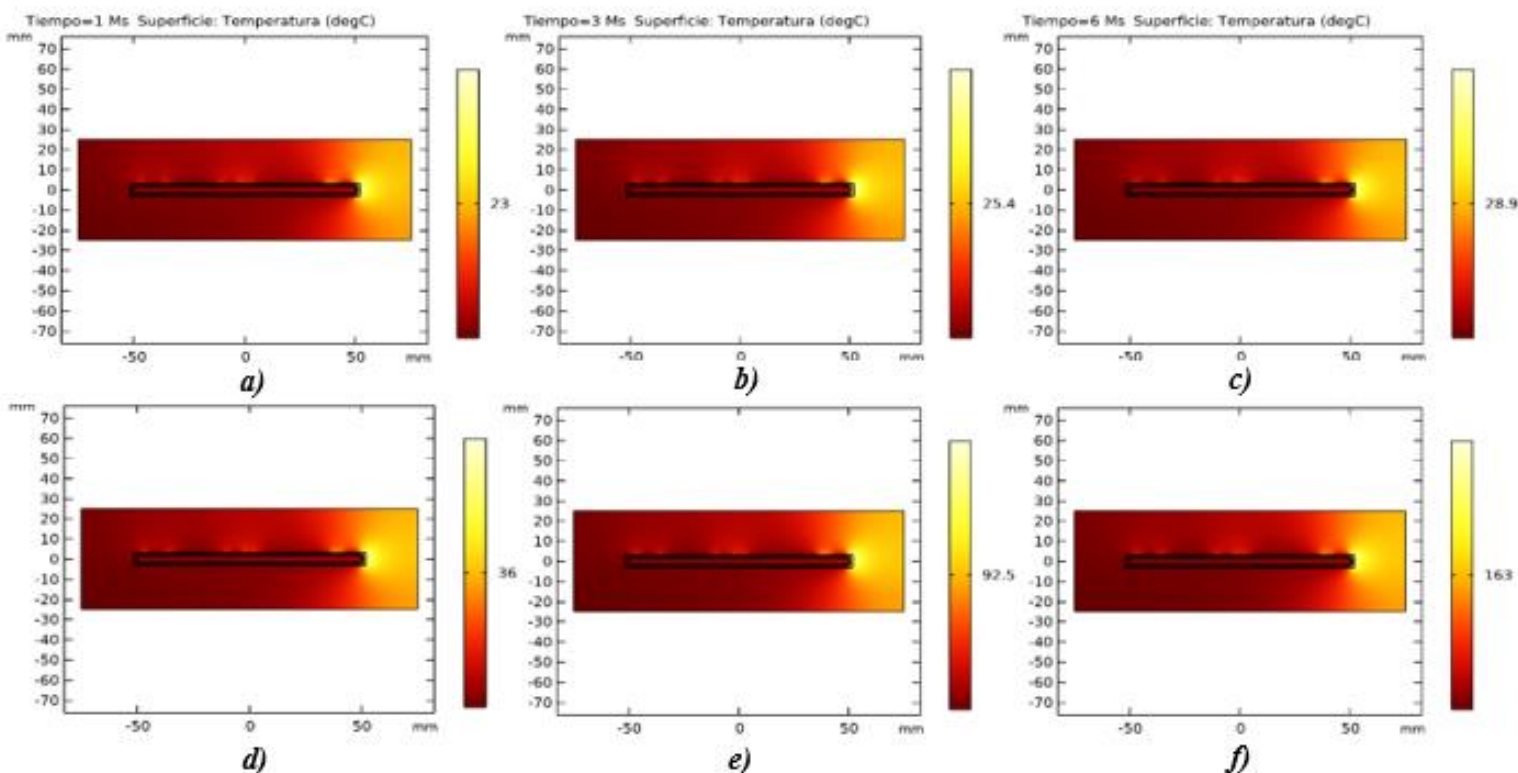


Fig. 19 Evolución térmica en la superficie del aislamiento del cable USE-2 a lo largo del tiempo: a) 1 mes 23 °C, b) 3 meses 25.4 °C, c) 6 meses 28.9°C, d) 1 año 36 °C, e) 5 años 92.5 °C, f) 10 años 163 °C

Estos resultados confirmaron que, aunque el cable USE-2 presenta desempeño térmico, su resistencia térmica disminuye considerablemente con el tiempo, siendo superado en capacidad de disipación por otros cables en periodos prolongados de exposición, lo que compromete su durabilidad frente a radiación UV-B constante.



4.1.3 Comportamiento eléctrico

Estos resultados examinaron el comportamiento de distintos cables analizando sus propiedades eléctricas. Durante este estudio se examinó el potencial eléctrico (V), norma del campo de desplazamiento eléctrico (C/m^2), densidad de la pérdida volumétrica, electromagnética (W/m^3), lo que permitió obtener una visión de su comportamiento eléctrico. En la simulación se observó cómo varía con el tiempo la densidad de potencia en los cables multicapa, donde tanto el efecto Joule como la absorción de radiación óptica generan calor. Esto permitió identificar zonas críticas de operación y los gradientes térmicos asociados.

4.1.3.1 Cable PV1-F

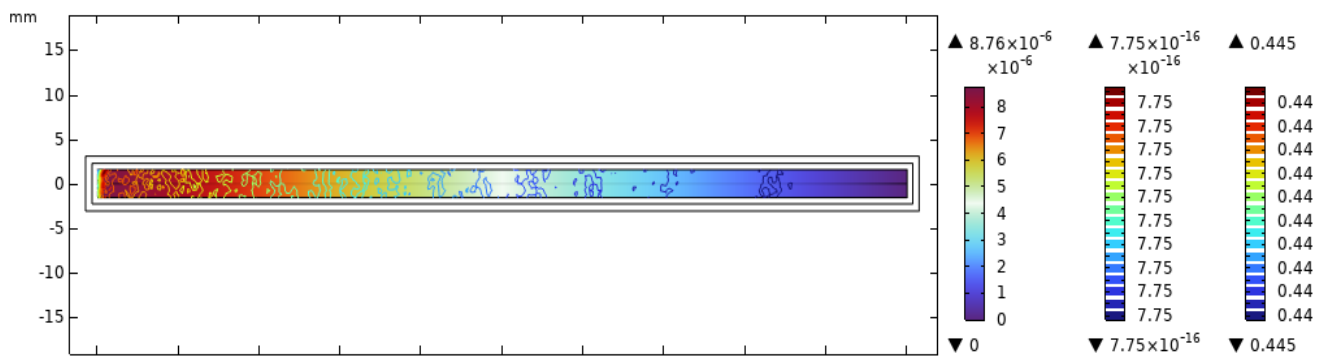
La secuencia de resultados de la Fig. 20 son los obtenidos del comportamiento eléctrico en el cable PV1-F. Estos confirmaron que el cable fotovoltaico efectivamente sufrió cambios en las propiedades eléctricas debido a la exposición prolongada a radiación UV-B.

En las primeras imágenes (figura a, b y c: 1, 3 y 6 meses), se observó una distribución de potencial uniforme en el conductor, con un campo de desplazamiento eléctrico concentrado en las esquinas internas del aislamiento, especialmente en las capas del conductor y aislante, donde se alcanzan los mayores gradientes eléctricos. Esto ya que esas zonas suelen ser más sensibles por su geometría. Sin embargo, a medida que avanzan los años (figura d, e y f: 1, 5 y 10 años), se evidenciaron cambios sutiles pero significativos. El campo de desplazamiento se extendió más hacia el aislamiento exterior, lo que indicó que el material empieza a perder su capacidad de contener al campo de

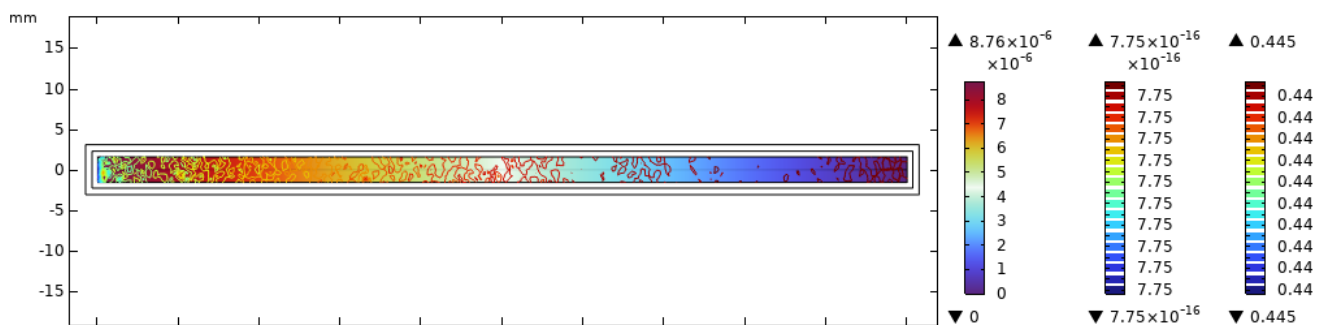


forma efectiva. La densidad de pérdida volumétrica mostro un incremento claro en las zonas cercanas al borde izquierdo del cable, esto es un indicativo de una posible pérdida de integridad eléctrica en el XLPO, dado que el incremento de pérdidas volumétricas y el desplazamiento de líneas de campo eléctrico reflejan una mayor permeabilidad del material al campo aplicado.

Estos efectos están relacionados con micro fisuras internas inducidas por el envejecimiento térmico y fotoquímico observado en los resultados térmicos previos. La exposición sostenida a radiación UV-B no solo afecto la estructura térmica del aislamiento, sino que también comprometi6 sus propiedades eléctricas, con impactos directos en la rigidez dieléctrica y la capacidad del material para resistir esfuerzos eléctricos prolongados, llegando así a fallas prematuras en condiciones reales de operación.



a)



b)

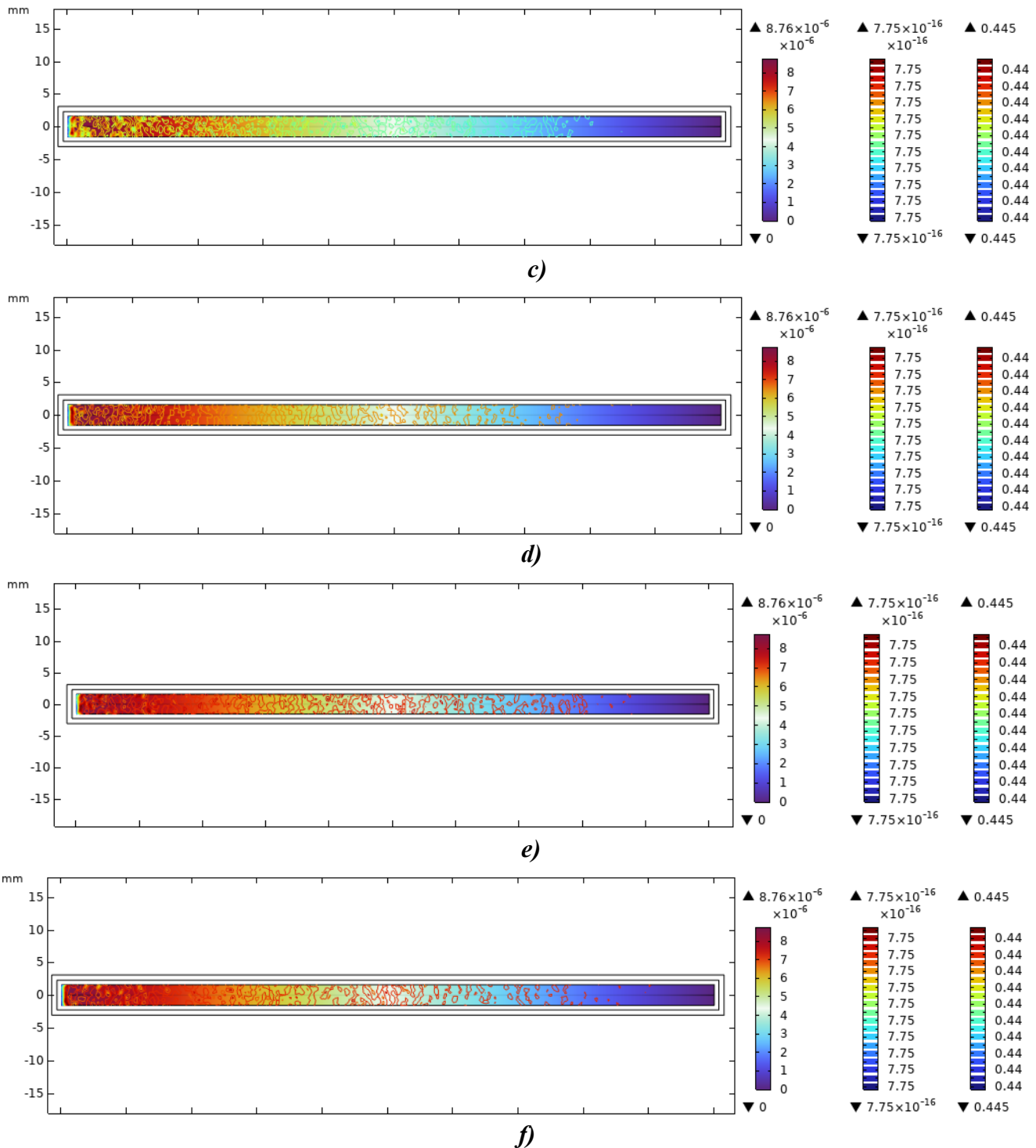


Fig. 20 Grafica de Potencial eléctrico (V), Norma del campo de desplazamiento eléctrico (C/m²), Densidad de la pérdida volumétrica, electromagnética (W/m³), a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 1 año, e) 5 años, f) 10 años

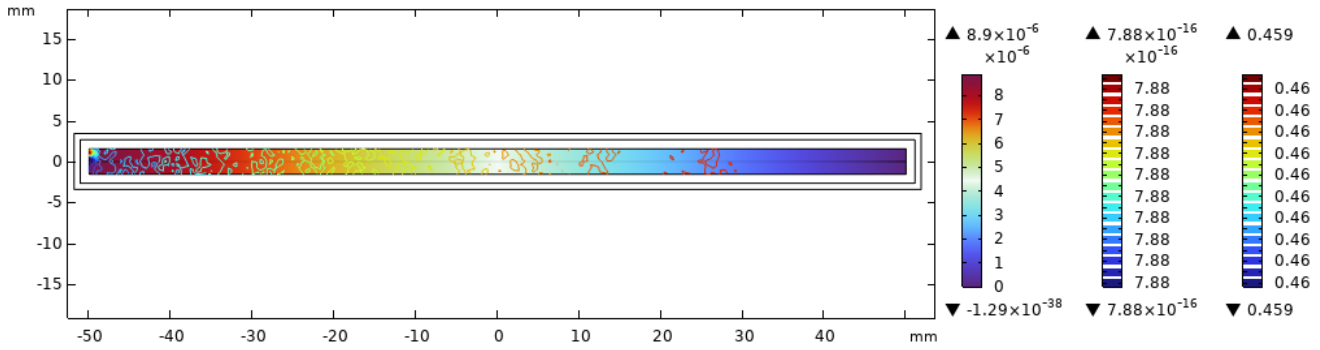


4.1.3.2 Cable PV-Wire

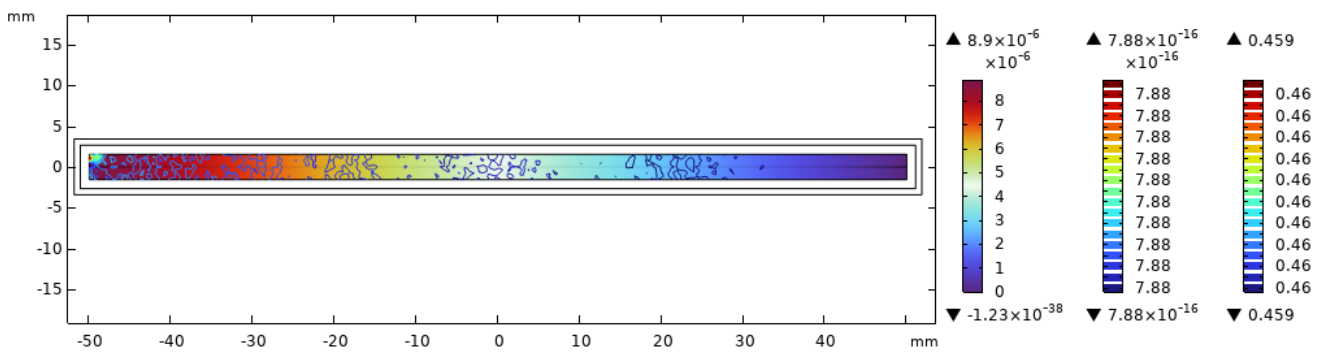
Los resultados de la simulación de la Fig. 21 revelaron un proceso de degradación del cable fotovoltaico bajo exposición a radiación UV-B. A medida que transcurre el tiempo, se observó una tendencia clara de concentración de los efectos eléctricos en la zona izquierda del cable, especialmente en las regiones entre el conductor-aislamiento. En el caso del potencial eléctrico, los mapas indicaron una distribución que se mantiene relativamente estable en magnitud, pero con una ligera extensión del gradiente hacia el extremo derecho conforme pasa el tiempo, lo cual puede deberse a una degradación gradual del aislamiento que reduce su capacidad de contener el campo eléctrico.

La norma del campo de desplazamiento eléctrico, se percibió zonas de mayor concentración cerca de los bordes del conductor, especialmente en los primeros meses (figura a, b y c: 1, 3 y 6 meses). Sin embargo, a partir del primer año (figura d), se advierte una expansión más amplia del campo eléctrico dentro del aislamiento, lo que sugirió un deterioro en sus propiedades dieléctricas. Esta expansión implica una mayor susceptibilidad del material a sufrir descargas parciales o fallas dieléctricas.

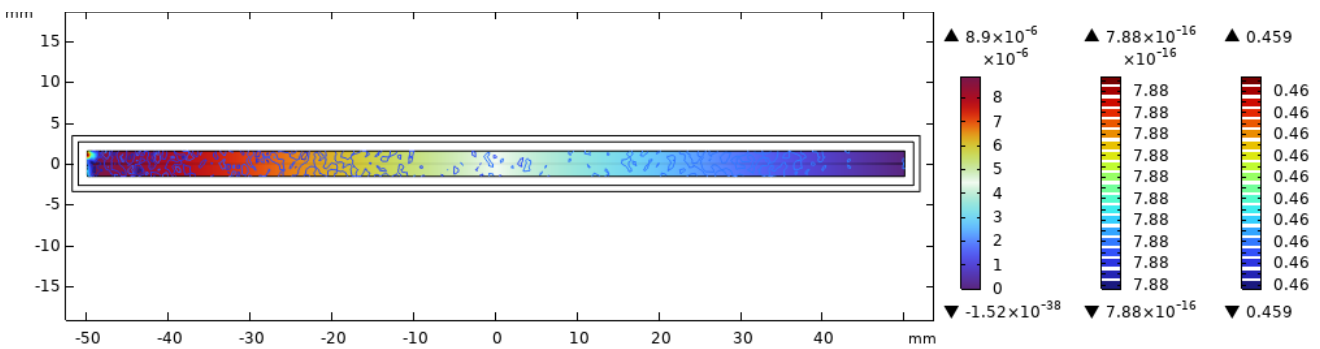
En cuanto a la densidad de pérdida volumétrica electromagnética mostro una acumulación significativa de pérdidas en la misma región izquierda del cable. Estas pérdidas, que implican disipación energética en forma de calor, se hacen más evidentes conforme avanza el tiempo. La persistencia de estas pérdidas en las mismas zonas, sin grandes variaciones espaciales, puede estar asociada a un daño acumulativo localizado, probablemente inducido por el envejecimiento térmico y la fotooxidación generada por la radiación UV-B.



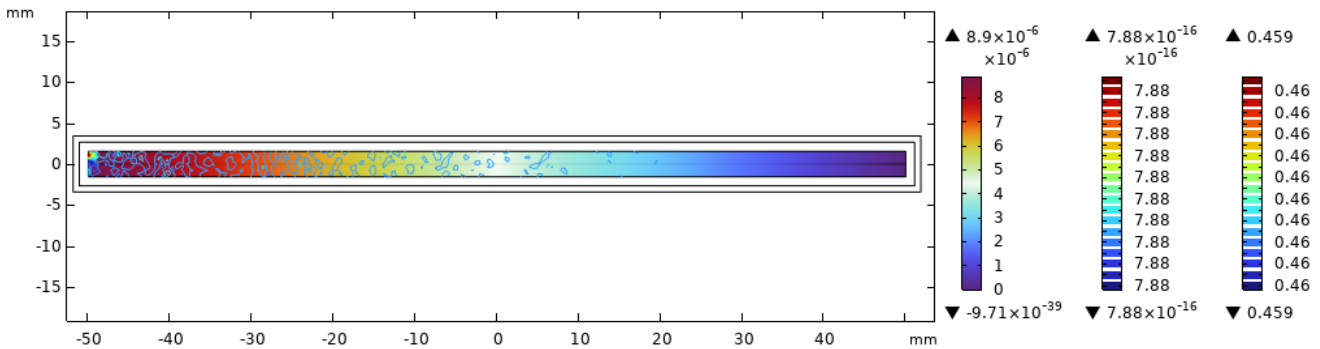
a)



b)



c)



d)

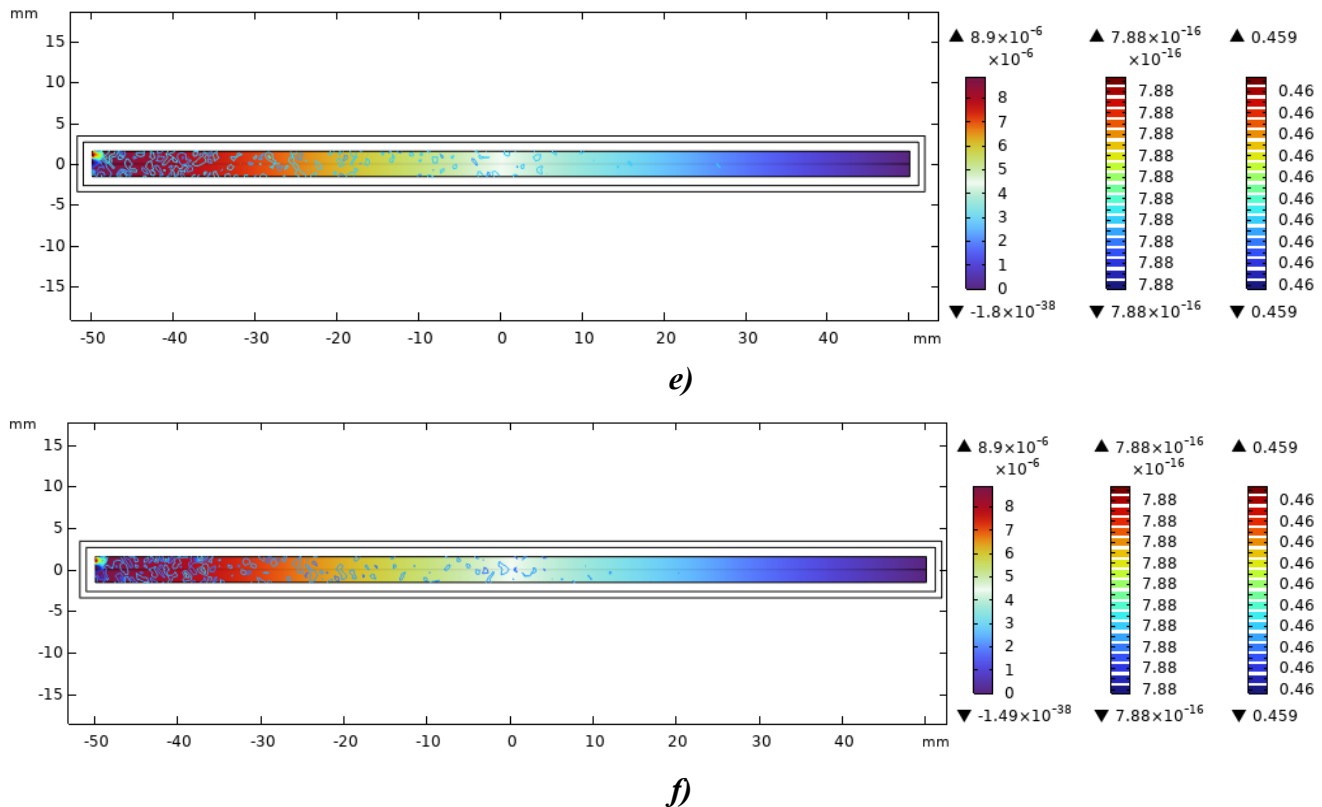


Fig. 21 Grafica de Potencial eléctrico (V), Norma del campo de desplazamiento eléctrico (C/m²), Densidad de la pérdida volumétrica, electromagnética (W/m³), a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 1 año, e) 5 años, f) 10 años

4.1.3.3 Cable H1Z2Z2-K

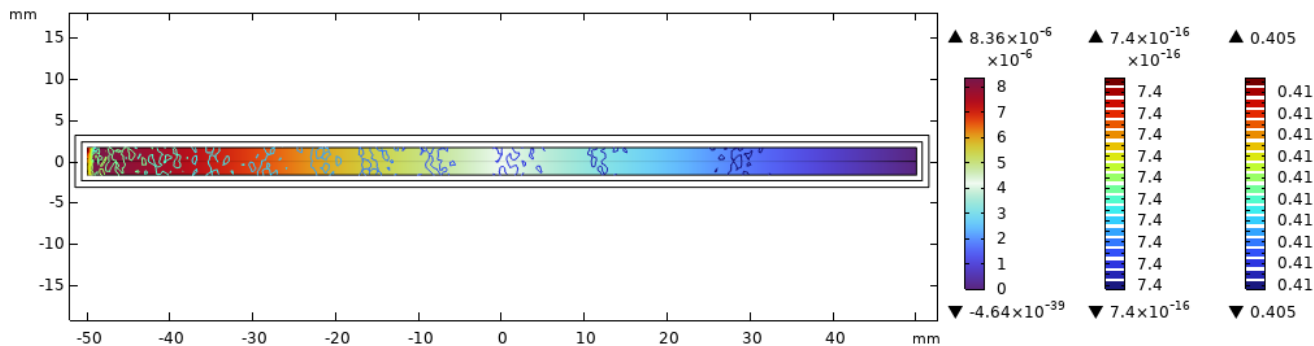
El resultado de la simulación de la Fig. 22 indico una evolución en el comportamiento eléctrico del aislamiento del cable. En la visualización del potencial eléctrico (columna izquierda), el gradiente de tensión permanece relativamente constante en todos los tiempos, lo que sugiere que la conducción eléctrica general del cable no presenta alteraciones notables con la exposición prolongada a la radiación UV-B.

Sin embargo, la norma del campo de desplazamiento eléctrico (columna central), se observó variaciones importantes. Al primer mes y tercer mes (figura a, b), el campo muestra una distribución más concentrada hacia el conductor, con intensidades

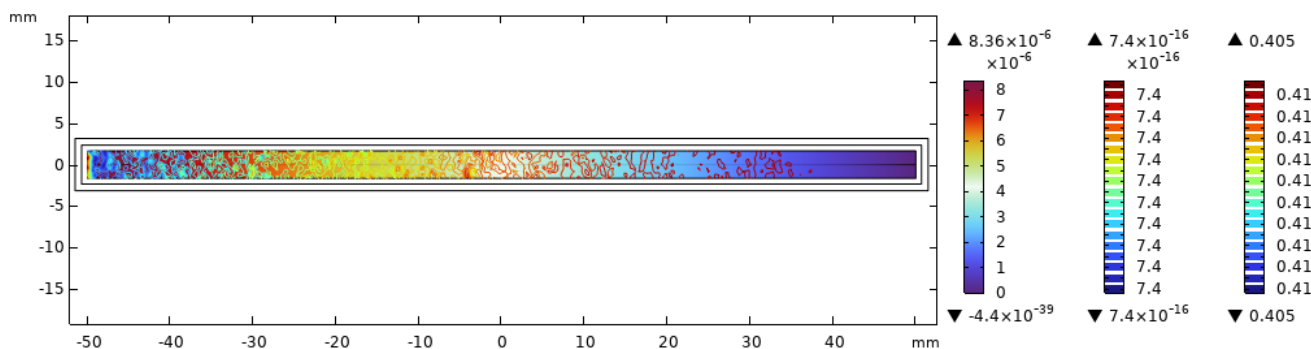


moderadas. Pero a partir de los 6 meses (figura c) y especialmente en los años 1, 5 y 10, (figura d, e y f) se observó una propagación más extensa del campo hacia las zonas externas del aislamiento. Esto indica un posible deterioro progresivo en la capacidad dieléctrica del material, posiblemente vinculado a la degradación inducida por la radiación UV-B.

En cuanto a la densidad de pérdida volumétrica electromagnética (columna derecha), los niveles de pérdida aumentaron ligeramente con el tiempo, siendo más notorios en la zona de contacto entre el conductor y el aislamiento interno. Este comportamiento sugirió un incremento paulatino en las pérdidas por efecto dieléctrico, posiblemente debido a micro daños o cambios en las propiedades del material aislante provocados por la exposición acumulada a la radiación.



a)



b)

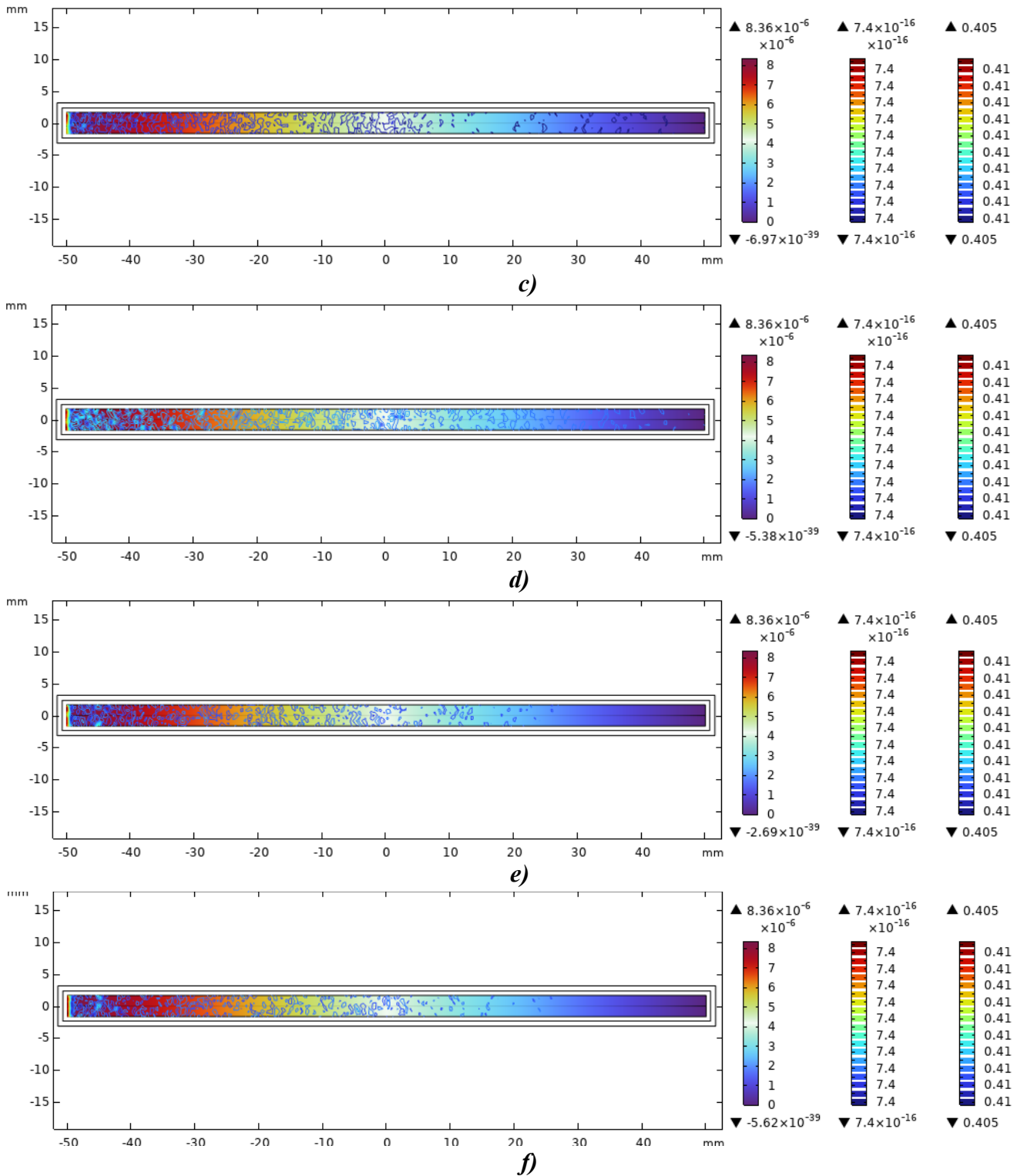


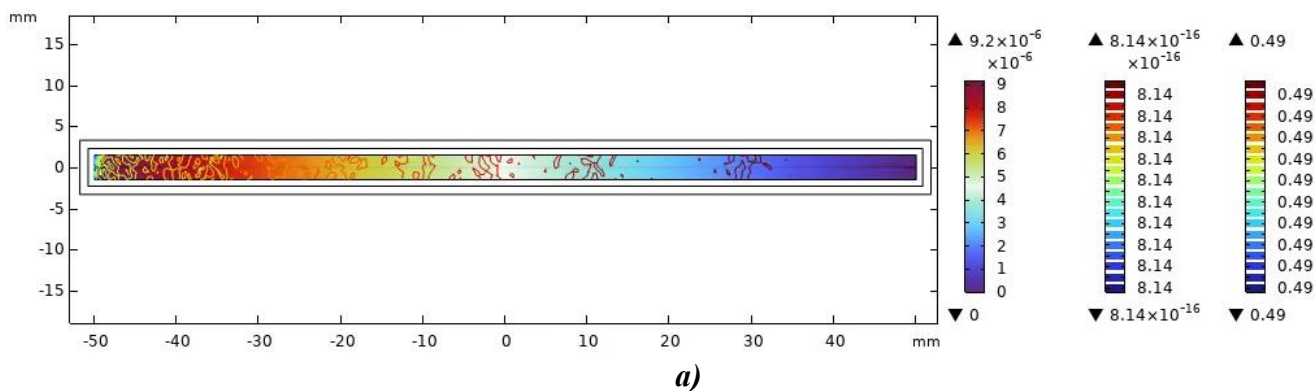
Fig. 22 Grafica de Potencial eléctrico (V), Norma del campo de desplazamiento eléctrico (C/m^2), Densidad de la pérdida volumétrica, electromagnética (W/m^3), a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 1 año, e) 5 años, f) 10 años

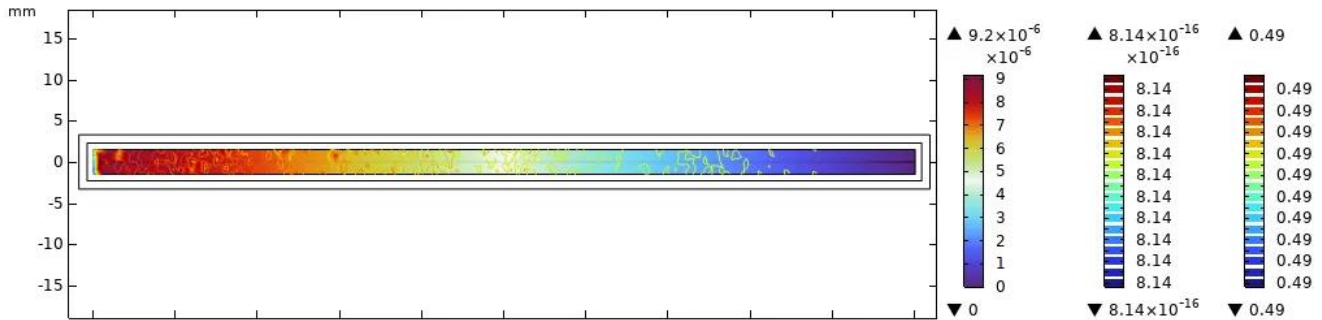


4.1.3.4 Cable USE-2

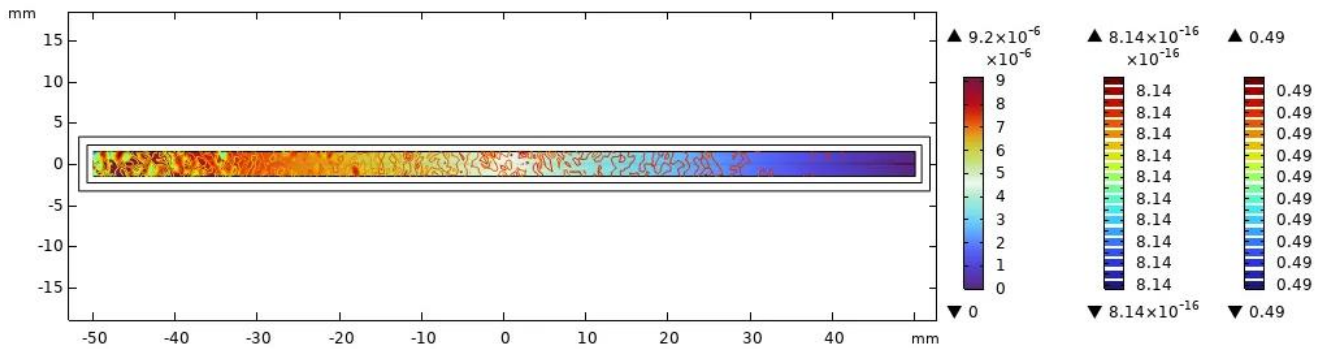
Los resultados eléctricos de la Fig. 23 se observó una evolución clara en el comportamiento eléctrico del cable fotovoltaico USE-2. Durante el primer mes (figura a), el potencial eléctrico mostro un gradiente suave y bien definido desde el conductor hacia el exterior, lo que indico una buena integridad dieléctrica del aislamiento. A medida que avanza el tiempo, se apreció un cambio progresivo: a los 3 y 6 meses (figura b, c), el campo de desplazamiento eléctrico comienza a concentrarse en ciertas regiones del aislamiento, especialmente cerca de las interfaces, lo que sugiere un inicio de deterioro del material.

Al alcanzar el año (figura d), y más notoriamente a los 5 y 10 años (figura e, f), se evidencio una mayor concentración del campo eléctrico en zonas localizadas, particularmente en las esquinas del conductor. Esto se acompaña de un incremento en la densidad de pérdida volumétrica, lo que refleja una mayor disipación de energía electromagnética en el material. Este fenómeno puede atribuirse a la degradación del aislamiento debido a la exposición prolongada a los rayos UV-B, provocando un aumento en la conductividad dieléctrica local y posibles caminos de corriente indeseados.

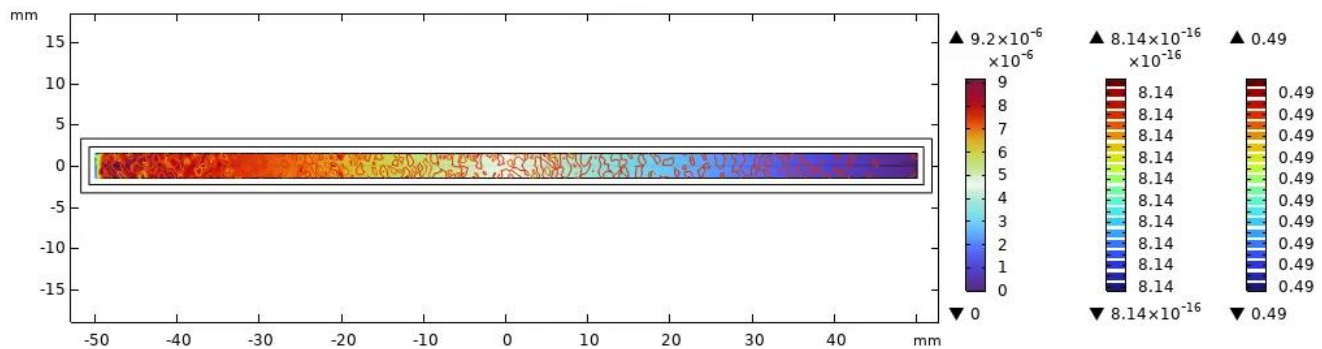




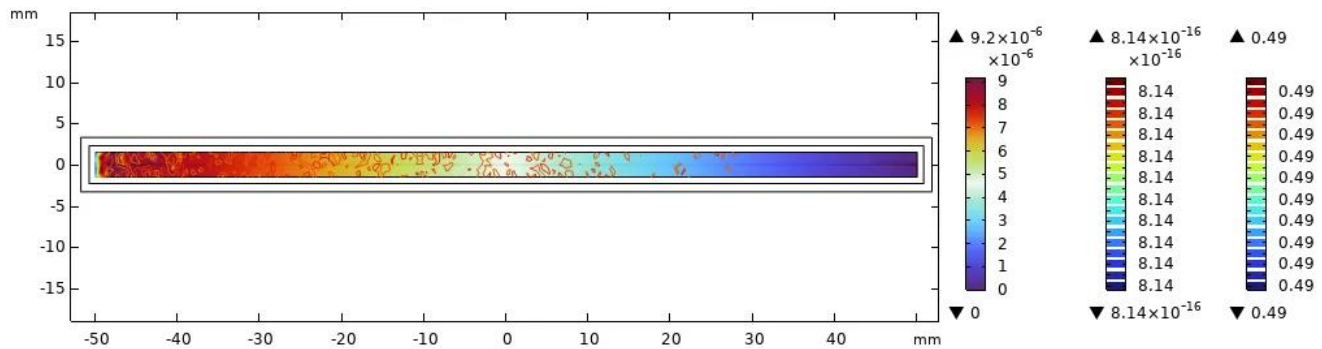
b)



c)



d)



e)

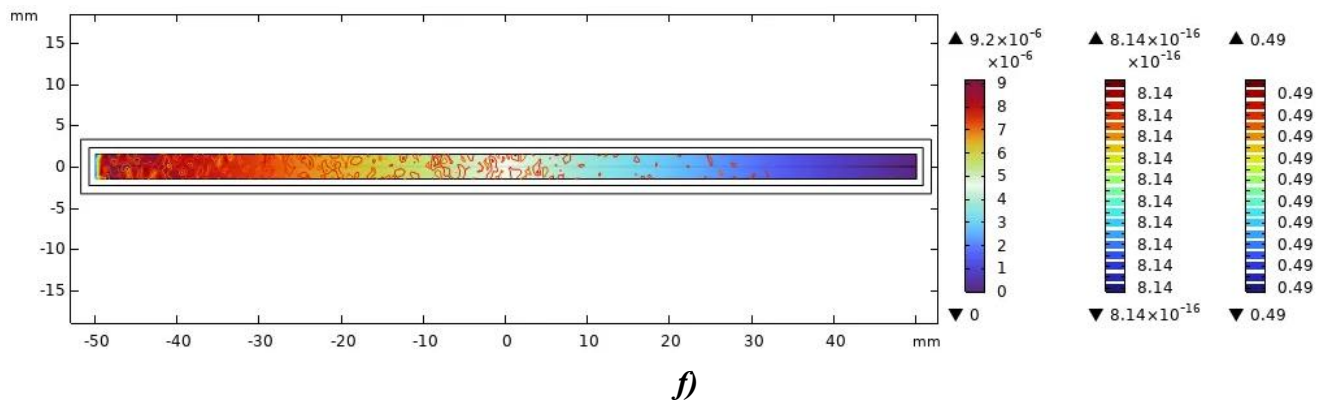


Fig. 23 Grafica de Potencial eléctrico (V), Norma del campo de desplazamiento eléctrico (C/m²), Densidad de la pérdida volumétrica, electromagnética (W/m³), a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 1 año, e) 5 años, f) 10 años

4.2 Análisis de los resultados

4.2.1 Análisis a la trayectoria de rayos

Al analizar los resultados de los cables PV1-F, PV-Wire, H1Z2Z2-K Y USE-2 a la trayectoria de rayos, se observó que los tres primeros cables presentan un comportamiento similar en cuanto a la distribución, absorción y reflexión, esto debido a que poseen un mejor material. Esta homogeneidad en los resultados confirma que el material XLPO proporciona mejores características de durabilidad.

Por el contrario, el cable USE-2 mostro una diferencia notable debido a que presenta una configuración con cubierta de XLPE y aislamiento de XLPO, se observó una diferencia notable en la escala de colores, siendo esta más estrecha (2.43 a 2.5), lo que demuestra cómo la diferencia de materiales poliméricos cambia el comportamiento en comparación a los otros cables, además, se evidencio como la cubierta de XLPE posee menores propiedades dieléctricas, teniendo así una menor resistencia y durabilidad. Este



resultando nos da un comportamiento diferenciado que podría tener implicaciones para su aplicación.

4.2.2 *Análisis térmico*

Al analizar la evolución térmica de todos los cables a través de diferentes períodos de tiempo (1, 3, 6 meses y 1, 5, 10 años), se observó un patrón consistente del comportamiento térmico que refleja directamente las diferencias en la composición y diseño de los materiales. Los cables PF1-F y H1Z2Z2-K, que comparten una configuración similar en la cubierta y aislamiento, mostraron temperaturas máximas muy similares en los primeros períodos analizados, manteniendo una distribución térmica prácticamente idéntica y gradientes de temperatura comparables a lo largo de la simulación. Esta homogeneidad térmica confirma que el material XLPO proporciona características de disipación de calor consistentes cuando se utiliza en ambas capas del cable. La pequeña diferencia de temperatura en los siguientes meses puede deberse al grosor del conductor, uno presenta 15mm de diferencia en comparación al cable PV1-F.

El cable PV-Wire presento características de protección similares a los cables PF1-F y H1Z2Z2-K, sin embargo, difiere significativamente en su resistencia térmica. Mientras que los cables mencionados anteriormente soportan de mejor manera, el PV-Wire alcanza una temperatura máxima de 150°C en los 10 años, lo que significa 10 grados más que los antes mencionados. Esta diferencia se puede atribuir al diseño de su cubierta, que resulta considerablemente más delgada en comparación con otros tipos de cable. Esta característica constructiva tiene como consecuencia que el conductor interno experimente un incremento de temperatura más rápido, lo que limita su capacidad de resistencia



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



térmica. La cubierta reducida, aunque mantiene las propiedades protectoras necesarias, compromete la capacidad de disipación térmica del cable, provocando que el calor generado por el paso de corriente se concentre más fácilmente en el conductor central. Este fenómeno explica por qué el PV-Wire, a pesar de compartir sistemas de protección similares, no puede igualar el rendimiento térmico de sus contrapartes con cubiertas más robustas.

Por el contrario, el cable USE-2, con su configuración mixta de cubierta XLPE y aislamiento XLPO, presenta diferencias térmicas notables, especialmente evidentes en los períodos de exposición más largos, donde se observó temperaturas más altas y patrones de distribución térmica distintos, alcanzando valores máximos que varían entre 25.4°C a los 3 meses y 28.9°C a los 6 meses, notando así ya un aumento significativo en comparación a los otros cables los cuales no llegaron a un valor tan alto como este que llegó a los 163°C en los 10 años, 20 grados más que los cables PV1-F y H1Z2Z2-K y 10 grados más que el PV-Wire. Esta variación térmica en el USE-2 es atribuible a las diferentes propiedades térmicas del material XLPE, donde se evidenció que este posee menores capacidades en comparación al material XLPO.

4.2.3 Análisis eléctrico

El estudio electromagnético de los cuatro cables fotovoltaicos (PV1-F, PV-Wire, H1Z2Z2-K y USE-2) reveló diferencias significativas en su rendimiento. El análisis del potencial eléctrico, campo de desplazamiento eléctrico y densidad de pérdida volumétrica electromagnética proporciona información importante de su comportamiento interno.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



De todos los cables, el H1Z2Z2-K presento el menor índice de pérdidas volumétricas con $0.405 W/m^3$ y el campo de desplazamiento más bajo registrado en $7.4 \times 10^{-16} C/m^2$, demostrando una estabilidad temporal manteniendo una distribución uniforme de campos electromagnéticos y presentando la menor concentración de pérdidas en los extremos del cable. Su comportamiento durante la década se caracterizó por una transición suave entre regiones de alta y baja intensidad electromagnética.

El cable PV1-F por su parte mostró un rendimiento equilibrado con pérdidas moderadas de $0.445 W/m^3$ y un campo de desplazamiento intermedio de $7.75 \times 10^{-16} C/m^2$. Este cable presento una degradación gradual pero controlada a lo largo del tiempo. Su evolución temporal se caracteriza por patrones de distribución electromagnética consistentes y una transición suave entre diferentes regiones de intensidad.

El PV-Wire presento pérdidas elevadas de $0.459 W/m^3$ y un campo de desplazamiento alto de $7.88 \times 10^{-16} C/m^2$. Este cable exhibió una degradación notable con mayor variabilidad, presentando un incremento progresivo en las pérdidas y variedad en la distribución de campos electromagnéticos. Particularmente, después de cinco años de operación, se observó una aceleración en la degradación, con una mayor concentración de estrés electromagnético que afecta su rendimiento a largo plazo.

El cable USE-2 presento las mayores pérdidas volumétricas de $0.49 W/m^3$ y el campo de desplazamiento más alto de $8.14 \times 10^{-16} C/m^2$. Su evolución temporal se caracteriza por pérdidas más significativas en toda la estructura, mayor estrés dieléctrico y una degradación más pronunciada desde las etapas tempranas de operación.



El análisis de la evolución temporal reveló patrones distintos de degradación. En el corto plazo (1-6 meses), el H1Z2Z2-K mostró una variación mínima y estabilidad excepcional, mientras que el PV1-F presentó una ligera degradación con comportamiento predecible. El PV-Wire exhibió cambios moderados en la distribución de campos, y el USE-2 demostró mayor variabilidad desde etapas tempranas. A largo plazo (1-10 años), el H1Z2Z2-K mantuvo parámetros estables, el PV1-F mostró una degradación lineal y controlada, el PV-Wire experimentó una aceleración en la degradación después de cinco años, y el USE-2 presentó una degradación constante y más pronunciada.

4.2.4 Análisis completo

A continuación, en la Tabla 14 se detalló el análisis de cada una de las muestras, donde se puede observar el comportamiento de cada uno de cables (PV1-F, PV-Wire, H1Z2Z2-K y USE-2) en términos de trayectoria de rayos, temperatura térmica y comportamiento eléctrico. Permitiendo llegar a la conclusión de que los aislamientos presentan un comportamiento casi similar, pero cada uno se comporta diferente de acuerdo con su composición y dimensiones, evidenciando así la durabilidad del material y como este con el tiempo sufre daños estructurales.



Tabla 14 Comparativa del comportamiento de cada cable en las distintas pruebas

CABLE	Comportamiento óptico	Comportamiento Térmico	Comportamiento eléctrico	Conclusión
H1Z2Z2-K	Presenta distribución uniforme, buena absorción y reflexión	Excelente disipación térmica	Menor pérdida volumétrica $0.405 W/m^3$ y campo de desplazamiento. Alta estabilidad y menor degradación.	Mejor desempeño global. Alta durabilidad ante radiación UV-B y cargas térmicas y eléctricas
PV1-F	Presenta comportamiento similar al H1Z2Z2-K	Buen rendimiento térmico, temperaturas controladas, ligera degradación inicial	Perdidas moderadas $0.445 W/m^3$. Comportamiento eléctrico estable y distribución uniforme de campos	Alto desempeño general. Comportamiento consistente y buena durabilidad
PV-Wire	Presenta buena distribución óptica, pero su cubierta más delgada afecta la disipación de energía	Mayor acumulación térmica, disipación limitada por su cubierta	Perdidas altas $0.459 W/m^3$. degradación acelerada. Campos menos estables	Desempeño medio. Afectado por diseño constructivo que reduce resistencia térmica y estabilidad a largo plazo.
USE-2	Presenta mayor concentración óptica. Menor reflexión por su cubierta XLPE. Alta absorción UV-B.	Comportamiento térmico más crítico. Degradación rápida desde los primeros meses.	Mayores pérdidas $0.49 W/m^3$ y campo mas alto. Degradación significativa y estrés eléctrico desde etapas tempranas	Peor desempeño. Material XLPE reduce resistencia térmica y eléctricas. Menor durabilidad.



CONCLUSIONES

- La exposición prolongada a radiación UV-B provoca un deterioro progresivo en el aislamiento eléctrico de los cables fotovoltaicos, con acumulaciones considerables de temperatura a lo largo del tiempo, debido a la fotooxidación y acumulación térmica, lo que reduce la rigidez dieléctrica comprometiendo la integridad estructural y el rendimiento eléctrico.
- El cable H1Z2Z2-K exhibe una resistencia superior a la degradación por UV-B, con una densidad de pérdida volumétrica electromagnética y un campo de desplazamiento eléctrico más bajo entre todas las muestras, atribuible a su aislamiento XLPO y mayor capacidad de disipación térmica, motivo por el cual es el mejor conductor del mercado.
- La combinación del material XLPE y XLPO en el cable USE-2 resulta en una mayor susceptibilidad a la degradación térmica y eléctrica, debido a diferencias en los coeficientes de absorción UV y conductividad térmica, acelerando la ruptura de enlaces poliméricos y sugiriendo la necesidad de optimizar la selección de materiales según la exposición ambiental.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda complementar las simulaciones con pruebas físicas de envejecimiento acelerado en laboratorios, replicando las condiciones de radiación UV-B y temperaturas simuladas, para validar la degradación eléctrica y térmica de los cables (PV1-F, PV-Wire, H1Z2Z2-K, USE-2), fortaleciendo la fiabilidad de las conclusiones del estudio.



BIBLIOGRAFIA

- [1] P. SOLAR, "Energía solar," *Acesso em*, vol. 15, no. 03, pp. 202013-2014, 2020.
- [2] N. A. Salazar Peña, "Detección de fallas en sistemas solares fotovoltaicos por medio de modelado y algoritmos computacionales," 2021.
- [3] X.-H. He, H. Ding, H.-Q. Jing, F. Zhang, X.-P. Wu, and X.-J. Weng, "Wind-induced vibration and its suppression of photovoltaic modules supported by suspension cables," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 206, p. 104275, 2020.
- [4] F. U. Khan, A. F. Murtaza, H. A. Sher, K. Al-Haddad, and F. Mustafa, "Cabling constraints in PV array architecture: Design, mathematical model and cost analysis," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 182742-182754, 2020.
- [5] D. G. Lamas, "Las sombras de la energía solar fotovoltaica," *Perspectivas Metodológicas*, vol. 20, 2020.
- [6] M. Gozalbes Sánchez, "Estudio comparativo de tres sistemas aislados de diferente configuración," 2015.
- [7] C. A. Cadena, F. F. Tilca, and M. S. Vicente, "Diseño de una cámara de ensayos de radiación ultravioleta," *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 4, 2000.
- [8] T. E. K. Zidane, A. S. Aziz, Y. Zahraoui, H. Kotb, K. M. Aboras, and Y. B. Jember, "Grid-connected solar pv power plants optimization: A review," *IEEE Access*, 2023.
- [9] T. Dewi, P. Risma, and Y. Oktarina, "A review of factors affecting the efficiency and output of a PV system applied in tropical climate," in *IOP conference series: earth and environmental science*, 2019, vol. 258, no. 1: IOP Publishing, p. 012039.
- [10] J. A. Tsanakas, L. Ha, and C. Buerhop, "Faults and infrared thermographic diagnosis in operating c-Si photovoltaic modules: A review of research and future challenges," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 62, pp. 695-709, 2016.
- [11] A. LUNA, "Eficiencia en paneles solares Efficiency in solar panels," *Diseño*, p. 9.
- [12] S. Ekici and M. A. Kopru, "Investigation of PV system cable losses," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 7, no. 2, pp. 807-815, 2017.
- [13] Y. Zhang, H. Chen, and Y. Du, "Considerations of photovoltaic system structure design for effective lightning protection," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 4, pp. 1333-1341, 2020.
- [14] M. A. Abella, "Dimensionado de sistemas fotovoltaicos," *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas". Tesis para optar al título de maestría, Departamento de Energías Renovables. Escuela de organización industrial*, 2014.
- [15] D. M. Hernandez, "Control digital para convertidor multinivel alimentado con energía solar," 2006.
- [16] E. Solar, "Energía solar fotovoltaica," *Página consultada en la web el*, vol. 26, 2007.
- [17] M. A. Laborde and R. Williams, "Energía solar," *Buenos Aires: Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 2016.
- [18] F. Adler, M. Berardi, M. García Pedrosa, F. Monticelli, and M. Morquecho, "Energía solar fotovoltaica," *Instalaciones Industriales*, pp. 12-19, 2013.
- [19] E. H. R. Cámara, L. C. O. López, L. J. R. Castellanos, E. De la Cruz May, and R. J. P. Escalante, "Diseño de una micro red eléctrica inteligente con sistema fotovoltaico y celda de combustible," *Pistas educativas*, vol. 38, no. 120, 2018.



- [20] M. Molina-García and C. MELCHOR-HERNÁNDEZ, "Prototipo de un sistema fotovoltaico autónomo," *Volumen 3, Número 8–Julio–Septiembre-2016*, p. 9, 2016.
- [21] J. A. H. Mora, C. L. T. Rodríguez, and W. A. V. Lozada, "Modelo de un sistema fotovoltaico interconectado," *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, vol. 17, no. 1, pp. 26-34, 2013.
- [22] I. C. Benavente, "Análisis de un sistema fotovoltaico híbrido doméstico," *Univ. Carlos Iii Madrid Esc. Politécnica Super*, p. 102, 2015.
- [23] J. N. Vargas De la Cruz, "Reajuste del sistema de protección en corriente continua para la mejora de confiabilidad de la Planta Fotovoltaica de Majes-Arequipa," 2022.
- [24] A. Sánchez Márquez, "Estudio termoelectrico de cables aéreos para redes mixtas DC/AC," 2020.
- [25] J. Hernanz Gómez, "Diseño de una instalación solar fotovoltaica de 100 kW con conexión a red," 2023.
- [26] M. A. Espinoza Orellana and D. A. Zelaya Aguiar, "Propuesta de normativa para el uso de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en sistemas de generación en El Salvador," Universidad de El Salvador, 2022.
- [27] A. Ranero Mata, "Estudio de viabilidad de un sello de calidad para paneles fotovoltaicos de segundo uso," 2021.
- [28] H. J. L. Galindo and L. A. M. Reyes, "Diseño de simulador de pruebas de calidad en cables THHN/THWN-2," 2023.
- [29] M. M. Vasquez Narvaez, "Clasificación de fallas en paneles fotovoltaicos: Una revisión," 2023.
- [30] A. Mellit, G. M. Tina, and S. A. Kalogirou, "Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 1-17, 2018.
- [31] T. C. G. Co. "0.6/1 kV SINGLE CORE PV1-F PHOTOVOLTAIC CABLE SOLAR CABLE." <https://www.thcable.com/0-6-1-kv-single-core-pv1-f-photovoltaic-cable-solar-cable.html> (accessed 16 de junio 2024, 2024).
- [32] L. Group. "Cable de panel solar Pv1-f para conexión de panel solar al inversor." <https://es.leader-solar.com/product/solar-panel-wire-pv1-f-cable-for-solar-panel-connection-to-inverter.html> (accessed 16 de septiembre 2024, 2024).
- [33] E. C.A. "solar fotovoltaico (PV WIRE)." <http://www.electrocable.com/index.php/es/categorias-productos/construccion/aluminio/solar-fotovoltaico-pv-wire.html> (accessed 22 de junio de 2024, 2024).
- [34] H. T. C. CO. "cables solar H1Z2Z2-K." https://www.tanocable.es/productos/otros-cables/cable-solar/cable-solar-h1z2z2-k.html?google-network=g-campaignid=12062264068-adgroupid=115187410686-target=kwd-2259573652506-creative=491384153713-device=c-placement=-keyword=cable%20solar%20fotovoltaico&gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMlg6vLx9HhhgMViaJaBR0D7g8zEAAYAiAAEgLbS_D_BwE# (accessed 16/06/2021, 2024).
- [35] M. cables. "Solflex H1Z2Z2-K." <https://www.miguelz.com/es/solflex-h1z2z2-k> (accessed 10 de octubre 2024, 2024).
- [36] SUNKEAN. "cable solar." https://es.sunkean.com/blog/cable-fotovoltaico-cable-pv-o-utilizar-2-cables-cual-es-mas-adecuado-para-paneles-solares_b41 (accessed 23 de junio de 2024, 2024).



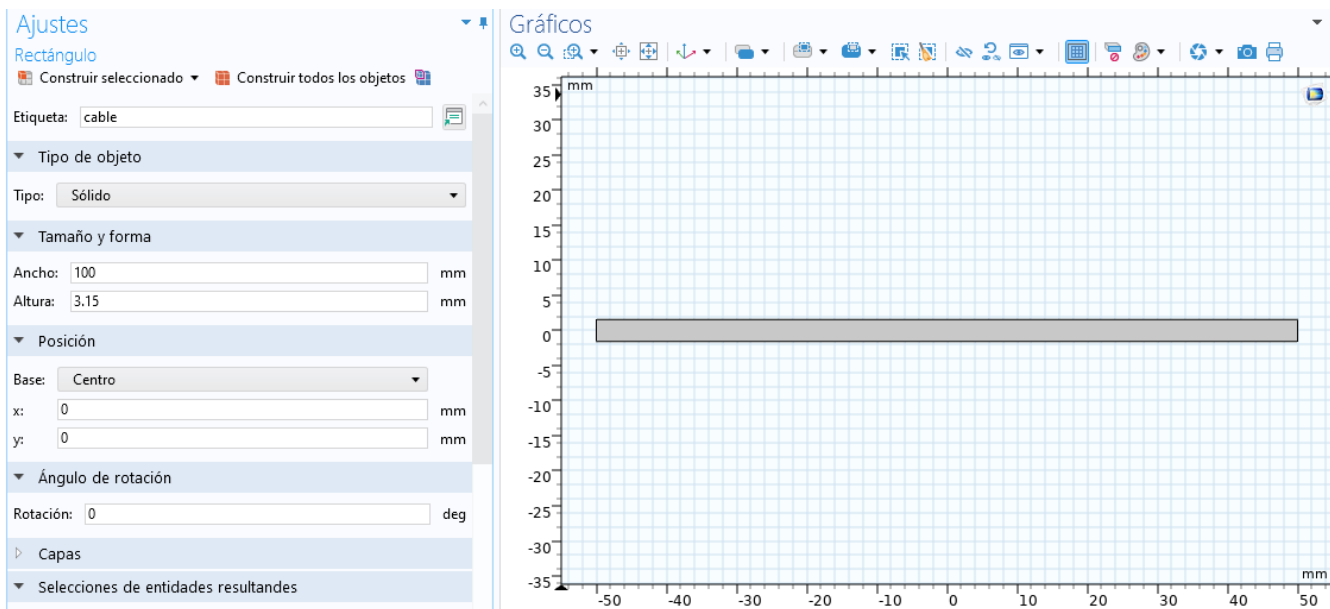
- [37] h. resources. "USE-2 600V PV Wire for Solar Applications."
<https://hybirdresources.com/product/use-2-600v-pv-wire-for-solar-applications>
 (accessed 20 octubre de 2024, 2024).
- [38] E. de Titto, "El adelgazamiento de la capa de ozono:¿ cómo prevenir los efectos adversos?."
- [39] V. A. Rodriguez Pinto and G. Ureta Tapia, "Estudio de la degradación por Radiación UV en tubos comerciales de PVC en la ciudad de Arequipa," 2019.
- [40] A. Hameed, "Study of Effect of Ultraviolet Radiation (UV) on Thermal Conductivity and Electrically Properties for Composites Materials (Ep/Micro-MgO And Ep/Nano-MgO) and Hybrid Composites," 2019.
- [41] D. en Ciencias, "Posgrado en Materiales Poliméricos," Centro de Investigación Científica de Yucatán, 2023.
- [42] R. Corrales-Brenes, "Análisis de degradación de los materiales utilizados en una carcasa expuesta a la intemperie usada en el proyecto GWSat: prototipo de monitoreo de humedales a través de un sistema espacial tipo Store and Forward," 2021.
- [43] E. J. S. Rodríguez and E. A. P. González, "Análisis de los cambios en las propiedades mecánicas de materiales de subrasante por la adición de materiales poliméricos reciclados," *Ingeniería Solidaria*, vol. 15, no. 1, pp. 1-23, 2019.
- [44] J. P. Martínez, R. G. Valverde, A. J. F. Romero, and U. Yeregui, *Polímeros conductores: Su papel en un desarrollo energético sostenible*. Reverté, 2020.
- [45] COMSOL. "The COMSOL Product Suite." <https://www.comsol.com/> (accessed 12 octubre de 2024, 2024).
- [46] COMSOL. "Heat Transfer Module." <https://www.comsol.com/heat-transfer-module> (accessed 12 enero de 2025, 2025).
- [47] COMSOL. "AC/DC Module." <https://www.comsol.com/acdc-module> (accessed 12 enero de 2025, 2025).
- [48] COMSOL. "Módulo de óptica de rayos." <https://www-comsol-com.translate.goog/ray-optics-module? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=tc> (accessed 12 enero de 2025, 2025).



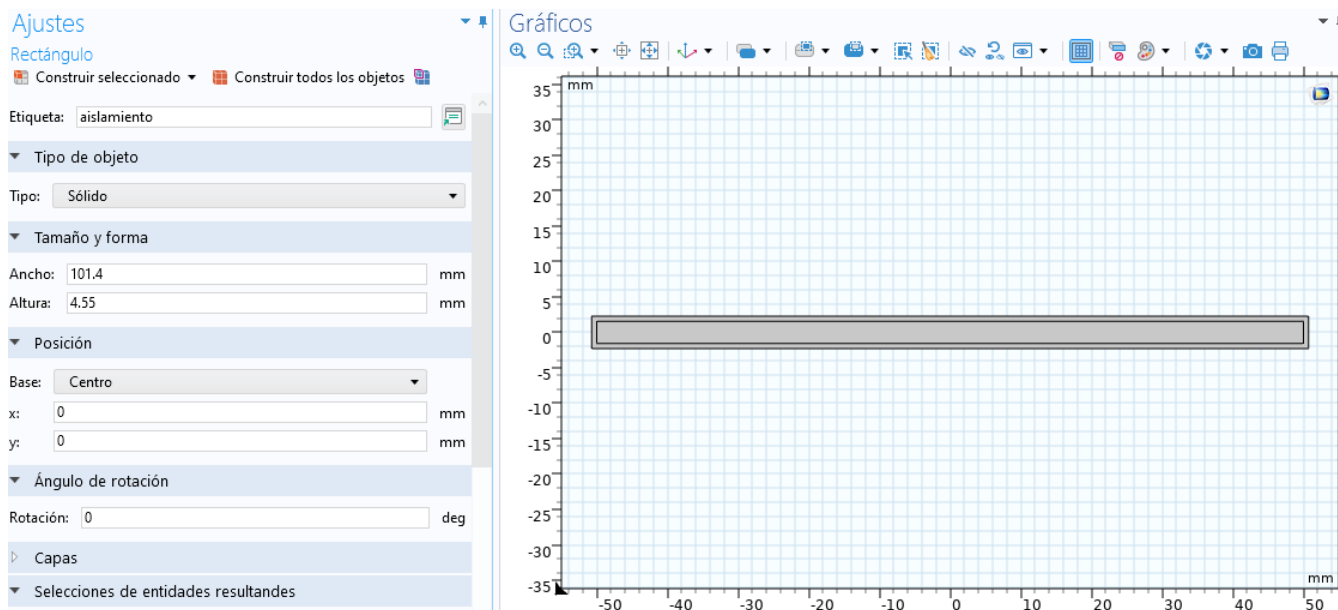
ANEXOS

Configuración y parámetros

- conductor

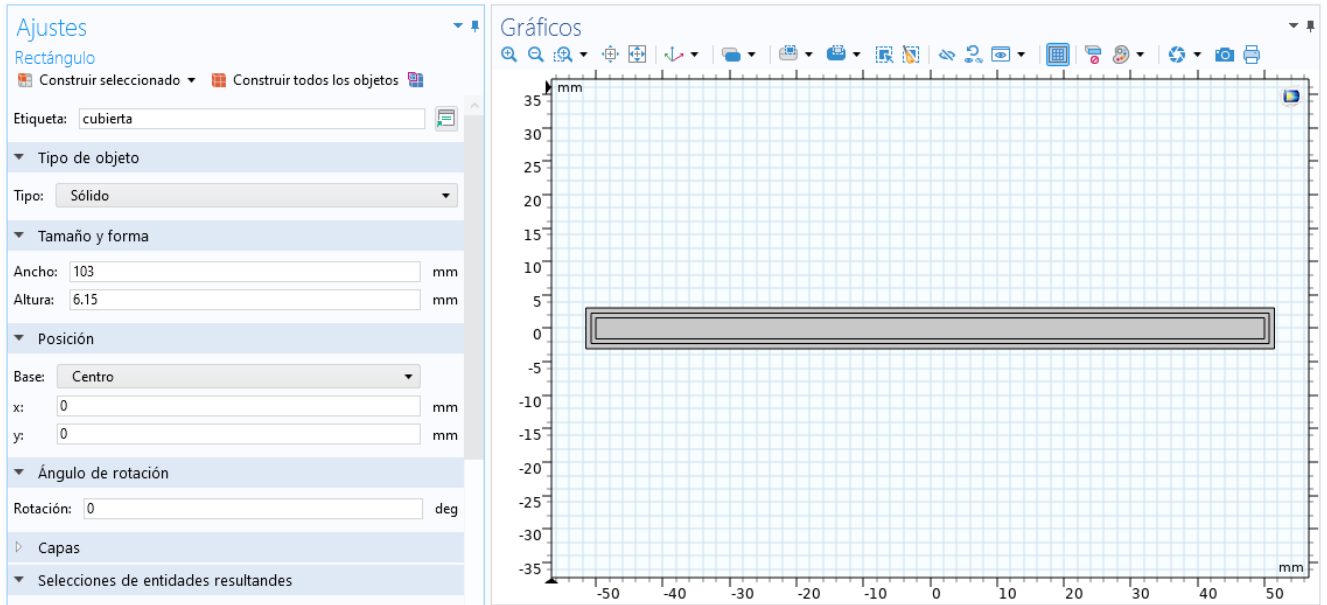


- Conductor más aislamiento

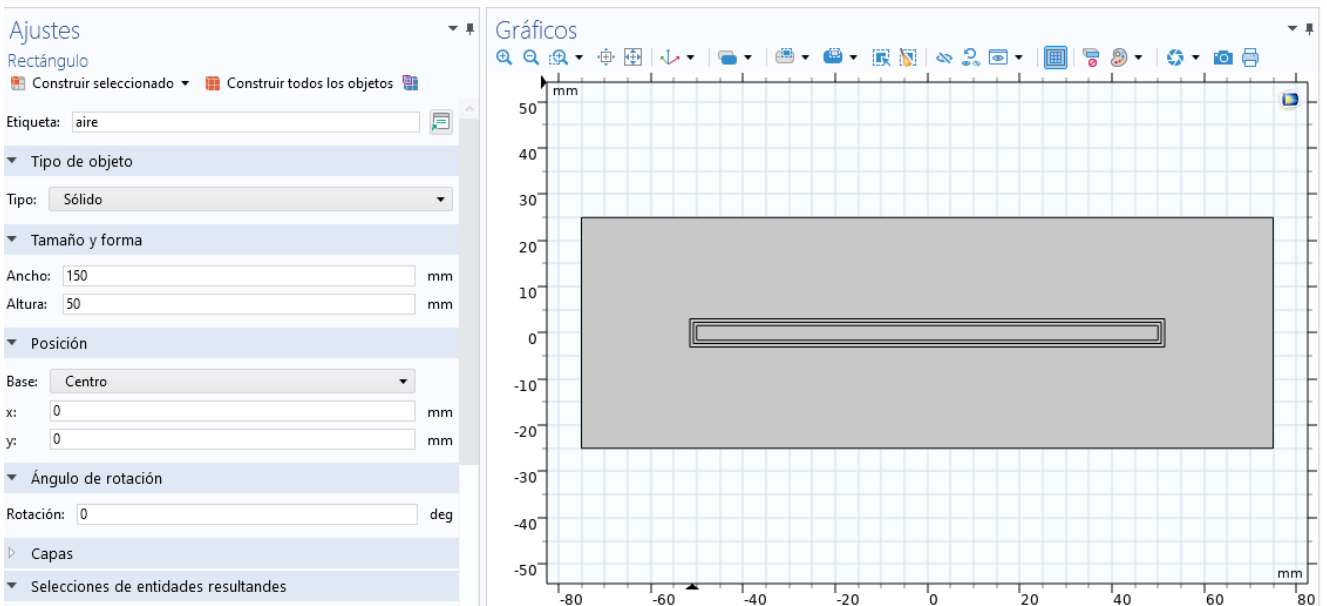




- Conductor, aislamiento, cubierta



- Dominio final (Conductor, aislamiento, cubierta, aire)



- Nodos empleados en el módulo de óptica geométrica



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



- v Óptica geométrica (*gop*)
 - Propiedades de medio 1
 - Discontinuidad de material 1
 - Propiedades de rayo 1
 - Propiedades de medio cubierta
 - Propiedades de medio aislamiento
 - Propiedades de medio conductor
 - Release from Boundary 1
 - Scattering Domain 1
 - Pared cubierta
 - Pared aislamiento
 - Pared cobre estañado
 - Pared aire
 - Terminación de rayo 1

- Nodos empleados en el módulo de transferencia de calor en solidos

- v Transferencia de calor en sólidos (*ht*)
 - Sólido 1
 - Valores iniciales 1
 - Aislamiento térmico 1
 - Aislamiento térmico 2
 - Fuente de calor 1
 - Fuente de calor 2
 - > Corrientes eléctricas (*ec*)

- Nodos empleados en el módulo de corrientes eléctricas

- v Corrientes eléctricas (*ec*)
 - Conservación de corriente 1
 - Aislamiento eléctrico 1
 - Valores iniciales 1
 - Terminal 1
 - Tierra 1
 - Aislamiento eléctrico 2

- Módulos multifísicas (acople entre módulos)

- v Multifísica
 - Fuente de calor por rayos 1 (*rhs1*)
 - Calentamiento electromagnético 1



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



- mallado de la muestra

Ajustes

Malla

Construir todo

Etiqueta: Malla 1

Tipo de secuencia

Malla controlada por la física

Malla controlada por la física

Tamaño de elemento:

Extremadamente fina

Contribuyente	Utilizar
Óptica geométrica (gop)	<input checked="" type="checkbox"/>
Transferencia de calor en sólidos (ht)	<input checked="" type="checkbox"/>
Corrientes eléctricas (ec)	<input checked="" type="checkbox"/>
Fuente de calor por rayos 1 (rhs1)	<input checked="" type="checkbox"/>
Calentamiento electromagnético 1 (emh1)	<input checked="" type="checkbox"/>

Gráficos

- estudio temporal

Constructor de modelo

Tipo de filtro de texto

- 1 pv1-f.mph (root)
 - Definiciones globales
 - Parámetros 1
 - Entradas de modelo por defecto
 - Materiales
 - Componente 1 (comp1)
 - Definiciones
 - Geometría 1
 - Materiales
 - Óptica geométrica (gop)
 - Transferencia de calor en sólidos (ht)
 - Corrientes eléctricas (ec)
 - Multifísica
 - Malla 1
 - Estudio 1
 - Paso 1: Dominio de la frecuencia
 - Paso 2: Temporal**
 - Configuraciones del resolvidor
 - Solución 3 (sol3)
 - Resultados
 - Conjuntos de datos
 - Vistas
 - Valores derivados
 - Tablas
 - Grupo gráfico 2D
 - Trayectorias de rayos (aop) 1

Ajustes

Temporal

Calcular Actualizar solución

Etiqueta: Temporal

Configuración del estudio

Unidad del tiempo: Ms

Tiempos de salida: range(0,1,120) Ms

Tolerancia: Controlado por la física

Resultados mientras resuelve

Selección de físicas y variables

Modificar configuración de modelo para paso de estudio

	Resuelve para	Forma de ecuación
<input checked="" type="checkbox"/> Óptica geométrica (gop)	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático (Tempo...
<input checked="" type="checkbox"/> Transferencia de calor en s...	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático (Tempo...
<input checked="" type="checkbox"/> Corrientes eléctricas (ec)	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático (Tempo...

	Resuelve para	Forma de ecuación
<input checked="" type="checkbox"/> Acoplamiento de mult...	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático (Temporal)
<input checked="" type="checkbox"/> Fuente de calor por ray...	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático (Temporal)
<input checked="" type="checkbox"/> Calentamiento electro...	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático (Temporal)

Valores de variables dependiente

Almacenar en la salida